

ГЛАВА 5. СПЕЦИАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ПРОФИЛИРОВАНИЯ АТМОСФЕРНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ И ТРОПОСФЕРЫ

5.1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Специальные методы профилирования были разработаны для получения данных с высоким временным и пространственным разрешением, которые необходимы для анализа, прогнозирования и научных исследований явлений малого метеорологического масштаба и для различных специальных применений. В настоящей главе дается общий обзор существующих наземных систем, которые можно использовать для этих целей. Глава делится на две основные части: методы дистанционного зондирования и прямого измерения *in situ*. Некоторые из этих методов могут применяться для измерений по всей тропосфере, другие используются в нижней тропосфере, в частности в атмосферном пограничном слое.

Методы дистанционного зондирования основаны на взаимодействии с атмосферой электромагнитной или акустической энергии. При использовании таких методов измерительный прибор и подлежащая измерению переменная разнесены в пространстве в отличие от измерений в точке (*in situ*). С прикладной точки зрения эти методы можно разделить на пассивные и активные. Пассивные методы основаны на использовании собственного теплового излучения атмосферы (микроволновые радиометры). Активные системы (сонары, радарные ветровые профилометры, системы радиоакустического зондирования (РАСС), лидары и ГНСС) излучают собственные искусственные сигналы в атмосферу. Эти методы дистанционного зондирования с поверхности Земли описаны в 5.2. Другие методы дистанционного зондирования, о которых говорится в этой главе, описаны в настоящем томе, глава 7 (Радиолокационные измерения), и в томе IV (Космические наблюдения).

В разделе 5.3 содержится описание контактных методов наблюдений с помощью приборов, размещенных на различных платформах, с целью проведения непосредственных наблюдений в атмосферном пограничном слое (аэростаты, специально оснащенные башни и мачты, специально оснащенные привязные аэростаты). В томе I, главы 12 и 13, настоящего Руководства описываются более широко используемые методы с применением шаров-зондов для проведения измерений профилей структурных параметров атмосферы.

Литература по методам зондирования весьма обширна. С общими вопросами и сопоставлениями можно ознакомиться в работах Derr (1972), IOM Report No. 3, Martner et al. (1993), в материалах специального выпуска *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* (том 11, № 1, 1994; см. <https://journals.ametsoc.org/view/journals/atot/11/1/atot.11.issue-1.xml>), совместного специального выпуска *Atmospheric Measurement Techniques and Geoscientific Model Development* (https://amt.copernicus.org/articles/special_issue1209.html) и Foken (2021).

Пользователи должны обратить внимание на подробную информацию, которая поставляется с конкретными коммерческими измерительными системами. В частности, большинство из них включают советы по выбору площадки, безопасности и сравнительным преимуществам конкретных алгоритмов обработки сигналов, которые могут быть включены или исключены.

5.2 МЕТОДЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ С ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ

5.2.1 Акустические зонды (содары)

Действие содаров (акустических радаров) основано на принципе рассеяния акустических волн атмосферой. Согласно теории рассеяния звука, звуковой импульс, излучаемый в атмосферу, рассеивается в ней под влиянием изменений индекса рефракции, вызываемых мелкомасштабными турбулентными флуктуациями температуры и скорости, которые происходят естественным образом в атмосфере и тесно связаны с наличием больших градиентов температуры и влажности в инверсиях. В случае обратного рассеяния (180°) возвратное эхо определяется лишь теми флуктуациями температуры, которые по масштабу составляют половину излучаемой акустической длины волны, а в других направлениях возвратное эхо вызывается колебаниями как температуры, так и скорости, за исключением угла в 90° , когда рассеяние не происходит.

Полезные сведения об акустическом зондировании содержатся в следующих публикациях: Brown and Hall (1978), Neff and Coulter (1986), Gaynor et al. (1990), Singal (1990) и Bradley (2007).

Разработано несколько различных типов акустических содаров, но оперативное применение нашли два обобщенных типа — моностатический содар и моностатический доплеровский содар.

Моностатический содар состоит из вертикально направленного источника пульсирующего звука и расположенного в том же месте приемника. Небольшая часть каждого звукового импульса рассеивается обратно в приемник под воздействием тепловых флуктуаций, происходящих естественным образом в воздухе. Приемник измеряет интенсивность отраженного акустического сигнала. Как и в обычном радиолокаторе, временная задержка между передачей импульса и приемом эха указывает на дальность до цели. В бистатическом содаре приемник расположен на некотором удалении от источника звука, что необходимо для приема сигналов, вызываемых флуктуациями скорости.

Моностатический доплеровский содар наряду с измерением интенсивности отраженного сигнала также анализирует частотный спектр передаваемых и принимаемых сигналов для определения сдвига доплеровской частоты между передаваемым и обратно рассеянным звуком. Это различие возникает в связи с движением температурных флуктуаций в воздухе и позволяет измерять радиальную скорость ветра в атмосфере. В доплеровском содаре для определения компонентов ветра в трех направлениях обычно используются три луча: один направлен вертикально, а два других отклонены от вертикали. По этим компонентам рассчитываются вертикальная и горизонтальная составляющие ветра. Векторный ветер может быть представлен на графике «время-высота» с шагом по высоте порядка 30—50 м.

Максимальная высота, достигаемая акустическими содарами, зависит от параметров системы, но изменяется также в зависимости от атмосферных условий. Имеющиеся в продаже системы могут обычно достигать высоты зондирования 600 м и более с разрешением по высоте в несколько десятков метров.

Содар может иметь следующие характеристики:

<i>Параметр</i>	<i>Типовое значение</i>
Частота импульса	1 500 Гц
Длительность импульса	0,05—0,2 с
Период повторения	2—5 с
Ширина луча	15°
Акустическая мощность	100 Вт

Моностатические содары обычно дают возможность построить график время-высота для мощности обратно рассеянного эхо-сигнала. Такие графики содержат ценную информацию о внутренней структуре атмосферного пограничного слоя и могут в принципе использоваться как для мониторинга высоты инверсии и глубины слоя перемешивания (характеризующих состояние устойчивости пограничного слоя атмосферы), так и для мониторинга глубины тумана. Однако правильная интерпретация таких графиков требует значительного опыта и глубоких знаний, а также, желательно, дополнительной информации, основанной на данных измерений *in situ*, в совокупности со знанием общей метеорологической ситуации.

Системы моностатических доплеровских содаров обеспечивают измерения профилей ветра, а также информацию об интенсивности. Такие системы представляют собой экономически эффективный метод получения данных о ветре в пограничном слое и особенно пригодны для непрерывного мониторинга инверсий и ветра вблизи промышленных предприятий, где существуют потенциальные проблемы загрязнения.

Основным ограничением систем содаров, помимо ограниченного охвата по высоте, является их чувствительность к шумовым помехам. Они могут вызываться воздушным движением, осадками или сильным ветром. Такое ограничение не позволяет использовать содары в качестве всепогодных систем. Содары сами излучают звук, характер и уровень которого может раздражать проживающих неподалеку людей, и это может исключать их использование в условиях урбанизированной окружающей среды, пригодной по другим параметрам.

В некоторых системах для снижения влияния внешних источников шума и уменьшения раздражающего воздействия на людей используется поглощающая пена. Однако физические свойства такой пены изменяются со временем, и ее необходимо периодически заменять для предотвращения ухудшения характеристик прибора.

5.2.2 Радиолокаторы для измерения профилей ветра

Термин «измеритель профилей ветра» часто используется как аббревиатура для целого класса доплеровских радаров, которые специально разработаны для определения вертикальных профилей ветра. В отличие от традиционных метеорологических радиолокаторов, они способны проводить измерения даже при отсутствии осадков и облаков. Эта возможность измерения в чистом воздухе является поистине уникальной особенностью этого радиолокатора. Использование длин волн от 0,2 до 7 м (соответствующих частотам в диапазоне около 1300–40 МГц) позволяет обнаруживать эхосигналы, рассеянные под влиянием неравномерности показателя преломления воздуха. Если они имеют пространственные масштабы, равные половине длины волны, излучаемой радиолокатором, то возникает конструктивная интерференция, которая делает обратный сигнал достаточно сильным, чтобы его можно было обнаружить (условие Брэгга). Обратите внимание, что чистое рассеяние воздуха не наблюдается, если половинная длина волны радиолокатора меньше внутреннего масштаба турбулентности, когда неравномерности показателя преломления исчезают из-за диссипативных эффектов вязкости. В аппроксимации первого порядка турбулентные структуры перемещаются со скоростью ветра, являясь тем самым непосредственной мерой скорости ветра.

Измерители профилей ветра не только принимают электромагнитные волны, рассеянные под влиянием неравномерности показателя преломления, но и эхо, рассеянное от частиц (в основном, от осадков), воздушных объектов (птиц, летучих мышей, самолетов) и даже от плазмы в каналах молнии. Кроме того, эхосигналы от земли могут приниматься через боковые лопасти антенны. Относительный вклад этих различных процессов рассеяния является функцией длины волны радиолокатора.

Существует два метода измерения ветра радиолокационными измерителями профилей ветра, а именно доплеровский метод и метод с разнесенными антеннами (Fukao et al., 2014), при этом в большинстве действующих систем используется первый метод.

В доплеровском методе частотный сдвиг, вызванный движением рассеивающихся частиц вдоль линии видимости определенного направления луча, измеряется и преобразуется в радиальную скорость. Горизонтальная и вертикальная компоненты ветра получаются в результате последовательных радиальных измерений ветра как минимум в трех линейно независимых друг от друга направлениях. Получение вектора ветра основано на дальнейших предположениях о структуре поля ветра. Горизонтальная однородность и стационарность среднего поля ветра позволяет получить простое замкнутое выражение этого алгоритма (см. Teschke and Lehmann, 2017). В простых доплеровских конфигурациях с качанием луча используется вертикально направленный луч и около двух-четырех косых (отклонение около 15° от вертикали) лучей. Большее количество косых лучей дает в целом лучшие результаты, чем простой трехлучевой метод (Adachi et al., 2005). Возможны и другие конфигурации, такие как индикатор скорости-азимут.

Технология разнесенных антенн использует вертикально направленный радарный луч и, по крайней мере, три независимые приемные вертикально направленные антенны. Это позволяет проводить корреляционную оценку скорости ветра на основе видимого движения обратно рассеянной интерференции или дифракционной картины на местности. Для получения оценки горизонтального ветра необходимо внести поправки на временные изменения рассеивающих конструкций. Метод разнесенных антенн и доплеровский метод имеют сравнительные преимущества и недостатки, некоторые из которых описаны в работе Dolman and Reid (2014).

Выбор рабочей частоты зависит от требуемой высоты зондирования и вертикального разрешения, но на него сильно влияют нормативные ограничения. На практике большинство систем выпускается для полос частот, определенных в соответствующих решениях о регулировании распределения спектра, принятых Всемирной конференцией по радиосвязи 1997 г., зафиксированных в МСЭ (2020). Получение необходимых частотных зазоров (эксплуатационных лицензий) может стать административной проблемой, а загрязнение радиочастотными помехами от других радиослужб, работающих в полосе частот, может привести к дополнительным трудностям в работе радиолокационного измерителя профилей ветра.

В приведенной ниже таблице представлены типовые характеристики.

<i>Параметр профилометра</i>	<i>Стратосфера</i>	<i>Тропосфера</i>	<i>Нижняя тропосфера</i>	<i>Атмосферный пограничный слой</i>
Частота (МГц)	50	400—500	400—500	1000
Высотный диапазон (км)	2—20	0,5—16	0,3—10	0,2—3
Вертикальное разрешение (м)	150—500	150—500	150—300	50—300
Типичный размер антенны (м)	100×100	10×10	6×6	3×3

В антеннах радиолокационных профилометров ветра, как правило, используется конструкция фазированной решетки с электронным управлением лучом, за исключением нескольких антенн тарельчатого типа с механическим управлением. Разрешение по вертикали зависит от длительности передаваемого импульса, и для конкретных настроек режима низкого и высокого разрешения обычно используются различные значения длительности импульса. Максимальная высота зондирования связана с длительностью импульса (через среднюю мощность), поэтому этот выбор делается в пользу высоты зондирования в ущерб разрешению по дальности. Методы сжатия импульсов также часто используются для улучшения высоты зондирования без ущерба для разрешения по дальности. В целом они эффективны, но потенциально могут порождать самопомехи (Wakasugi and Fukao, 1985).

Минимальная применимая высота зондирования зависит от размера антенны, длительности импульса, времени восстановления радиолокационного приемника и силы

сигнала возможного мешающего отражения от наземных предметов в ближнем диапазоне. Так как помехи от земной поверхности довольно изменчивы, эта минимальная высота зондирования может меняться в зависимости от времени и площадки.

Сила принимаемого сигнала, как правило, уменьшается с увеличением высоты. Это ограничивает высоту, до которой можно проводить измерения. В отличие от минимальной высоты зондирования, максимальная высота зондирования представляет собой статистическую величину, зависящую как от характеристик радиолокационного оборудования, так и от состояния атмосферы. Обычно она увеличивается с увеличением произведения средней мощности передатчика на апертуру антенны, но в основном подвергается физическому (чистое рассеяние воздуха) ограничению, заданному длиной используемой волны. Максимальная высота зондирования значительно варьируется в зависимости от метеорологических условий, и иногда могут возникать разрывы в покрытии на более низких высотах.

При установке профилометров следует проявлять осторожность, чтобы свести к минимуму мешающее отражение от наземных объектов и избежать возможных внутрислосных радиочастотных излучений других радиослужб.

Для крупных стратосферных профилометров требуются антенны большого размера и относительно мощные передатчики. В связи с этим бывает затруднительно найти соответствующую площадку, а их минимальная высота зондирования недостаточно хороша для некоторых применений. Преимущество их заключается в том, что они позволяют регулярно проводить измерения ветра до высоты около 20 км, и эти измерения не подвергаются сильному влиянию осадков. Тропосферные профилометры ветра, работающие в полосе частот 400—500 МГц, очевидно, являются наилучшим компромиссом между высотой зондирования и размером всей системы. Ветровые профилометры атмосферного пограничного слоя не так дороги и в них могут использоваться довольно небольшие антенны. Их вертикальная высота зондирования для измерений в чистом воздухе обычно ограничивается нижними слоями атмосферы, однако полезная вертикальная высота зондирования может значительно увеличиться во время выпадения осадков, когда рассеяние от гидрометеоров становится доминирующим отражающим механизмом.

Обработка сигнала для доплеровских ветровых профилометров аналогична обработке, применяемой на других доплеровских радарх. В отличие от метеорологических радаров, доплеровское разрешение скорости, как правило, лучше благодаря более длительному времени выдержки, а возможность алиасинга дальности и частоты может быть полностью исключена при разумной конфигурации режима измерений. Так как ветровые профилометры рассчитаны на получение очень слабых сигналов от колебаний показателя преломления, то обязательными являются специальные алгоритмы фильтрации отраженных сигналов от наземных объектов и периодических помех. Периодические помехи включают нежелательные отраженные сигналы от самолетов, птиц и насекомых. В частности, перелетные птицы могут привести к серьезным ошибкам в оценке скорости ветра, если не будет реализовано периодическое подавление помех (Bianco et al., 2013).

Измерение радиального ветра может быть выполнено с разрешением в несколько секунд. Поскольку для большинства профилирующих длин волн гидрометры представляют собой более эффективную радиолокационную цель, чем неоднородности по индексу преломления, измеренная радиальная скорость может быть средневзвешенной величиной скорости воздуха и скоростей рассеивающих частиц. Практический опыт показал, что горизонтальный вектор ветра может быть оценен с достаточной точностью как по чистому воздуху, так и по рассеянию частиц, так как рассеивающие частицы обычно почти мгновенно следуют за горизонтальным полем ветра. Таким образом, горизонтальный ветер действительно может быть получен практически в любых погодных условиях. Более крупные ошибки возникают только при нарушении неявных предположений, используемых в алгоритме оценки ветра. Обратите внимание, что вертикальный ветер можно измерить только в чистой (без частиц) атмосфере.

Радиолокационные ветровые профилометры являются проверенными системами, позволяющими проводить непрерывные, автоматические оперативные измерения среднего (аэрологического) вертикального профиля ветра непосредственно над площадкой. Типичное временное разрешение для одного профиля ветра составляет от 10 до 60 минут, в зависимости от характеристик и конфигурации прибора. Положительное влияние таких данных на численные прогнозы погоды было успешно продемонстрировано (см., например, Illingworth et al., 2015).

Дополнительные сведения можно найти в работах: Gossard and Strauch (1983), Hogg et al. (1983), Weber et al. (1990), Weber and Wuerz (1990), Neisser et al. (1994), Wilczak et al. (1996), Muschinski et al. (2005), Hocking (2011), Doviak and Zrnić (2014), Fukao et al. (2014) и Hocking et al. (2016).

Дальнейшие указания по проектированию, изготовлению, установке и техническому обслуживанию радиолокационного ветрового профилометра приводятся в [Приложении 5.А](#).

5.2.3 Радиоакустические системы зондирования

Радиоакустическая система зондирования (РАСС) используется для измерения профиля виртуальной температуры в нижней тропосфере. С помощью доплеровского микроволнового радиолокатора прослеживается короткий акустический импульс высокой интенсивности, который излучается из того же места вертикально в атмосферу. Методика измерения основана на том, что акустические волны являются продольными и обуславливают изменения плотности окружающего воздуха. Эти изменения приводят к соответствующим изменениям локальных значений индекса рефракции атмосферы, что, в свою очередь, вызывает обратное рассеяние электромагнитной энергии, излучаемой микроволновым доплеровским радиолокатором, которая распространяется вместе с акустическим импульсом. Микроволновый радиолокатор измеряет скорость распространения этих возмущений индекса рефракции, набирающих высоту с локальной скоростью звука. Длина акустической волны выбирается так, чтобы она укладывалась в половине длины волны микроволнового радиолокатора (условие Брэгга), в этом случае энергия, обратно рассеянная от нескольких акустических волн, согласованным образом суммируется в приемнике, значительно увеличивая мощность отраженного сигнала. На основе измерения скорости распространения акустического импульса можно рассчитать виртуальную температуру, поскольку она пропорциональна квадрату разности скорости распространения импульса и вертикальной скорости движения воздуха.

По этой методике имеется обширная литература, в частности работы May et al. (1990), Lataitis (1992a, 1992b) и Angevine et al. (1994).

Для получения профиля виртуальной температуры разработаны разнообразные экспериментальные методы с применением качающейся акустической частоты. Однако для практического применения предстоит разработать профилометры ветра повышенной мощности и чувствительности. Разработано несколько РАСС, в которых к радиолокаторам профилей ветра упомянутого выше типа добавлены акустический источник и соответствующая обработка данных. Для частот радиолокатора 50, 400 и 1 000 МГц требуются акустические частоты порядка 110, 900 и 2 000 Гц. На частоте 2 000 Гц высота зондирования ввиду акустического ослабления, как правило, ограничена 1—2 км. На частоте 900 Гц в применяемых на практике системах высота зондирования может достигать 2—4 км, а на частоте 110 Гц при использовании крупных профилометров с частотой 50 МГц максимально достижимая высота зондирования при благоприятных условиях может составлять 4—8 км.

Сравнения с радиозондовыми измерениями показывают, что при хороших условиях виртуальная температура может измеряться с точностью до 0,3 °С с разрешением по высоте 100—300 м. Однако при сильном ветре и осадках точность таких измерений может резко уменьшиться.

Измерения с помощью РАСС — перспективный метод получения профилей виртуальной температуры. Он используется в оперативном режиме, но имеет известные погрешности. Потребуется дополнительное исследование, прежде чем их можно будет с уверенностью использовать в диапазонах высоты, разрешения и точности, которые отвечают требованиям пользователей.

5.2.4 Микроволновые радиометры

Тепловое излучение в микроволновом диапазоне формируется в атмосфере, главным образом, кислородом, водяным паром и жидко-капельной влагой и зависит от их температуры и пространственного распределения. Для такого газа, как молекулярный кислород, распределение которого по высоте при заданном приземном давлении хорошо известно, тепловое излучение содержит информацию, прежде всего, о температуре атмосферы. Вертикальные профили температуры в нижней атмосфере могут быть получены с помощью наземных пассивных микроволновых радиометров, измеряющих микроволновое тепловое излучение молекулярного кислорода в спектральной полосе частот около 60 ГГц. Спектральные измерения в верхней части полосы частот 22—30 ГГц, которая расширяется с ростом давления в условиях абсорбции излучения водяными парами, дают информацию о количестве водяного пара, жидко-капельной влаги и вертикальном распределении водяного пара. Кроме того, спектральные измерения в двух полосах в комбинации с измерениями температуры облаков инфракрасного спектра дают информацию о совокупном объеме и вертикальном распределении жидко-капельной влаги. Дополнительные сведения можно почерпнуть в работах Hogg et al. (1983), Westwater et al. (1990), Solheim et al. (1998), Ware et al. (2003) и Westwater et al. (2005).

Радиометры, работающие на различных частотах, максимально чувствительны к температуре в конкретных диапазонах атмосферного давления. График чувствительности как функции давления представляет собой колоколообразную кривую (весовая функция). Частоты радиометров выбираются таким образом, чтобы пики весовых функций были оптимально распределены по высотам, представляющим интерес. Профили температуры над пограничным слоем рассчитывают с помощью численных методов решения обратных задач, используя измеренное излучение и весовые функции. Методы космической радиометрии, описанные в [томе IV](#), не позволяют получить точные профили температуры вблизи поверхности и в пограничном слое. Это объясняется относительно большой шириной весовых функций, излучением земной поверхности и тем фактом, что каналы, чувствительные к нижним слоям атмосферы, также будут чувствительны к температуре поверхностного слоя.

Достаточно изучены принципы наземного зенитного микроволнового радиометрического зондирования температуры и влажности. Температурные весовые функции вертикально направленных зондирующих радиометров имеют узкие пики у поверхности земли, величина которых снижается с высотой. Кроме того, чувствительность к эмиссиям молекулярного кислорода и водяного пара не ухудшается излучением от поверхности земли. Это дает возможность получения точных данных о температуре и влажности при относительно высоком разрешении в атмосферном пограничном слое и нижних слоях тропосферы. С другой стороны, ослабление микроволн в атмосфере и относительно большая ширина весовых функций для каналов, чувствительных к верхней части атмосферы, ограничивают точность получаемых температурных профилей над пограничным слоем. Методы обращения для вертикально направленных микроволновых радиометров основаны либо на климатологии температур и влажности для данного места, которая, как правило, определяется по данным радиозондирования, либо на вариационных методах моделирования соотношения между измеренными профилями излучения, вертикальными профилями температур и влажности.

Наземные радиометры обычно имеют низкую точность при получении температурных профилей во время дождя или снега. Это связано с накоплением воды, снега (Woods et al., 2005) или льда (Fernández-González et al., 2014) над обтекателем, отсутствием в алгоритме получения эффектов рассеяния и излучения/поглощения осадков, а также усиленным

ослаблением микроволн в атмосфере из-за осадков. Первая проблема может быть решена путем использования водостойкого обтекателя и направления воздушного потока над поверхностью радиометра, чтобы избежать скопления воды, снега и льда (Chan, 2009) или проведения наблюдений под внезенитным углом, чтобы избежать тонких пленок воды (Xu et al., 2014). Что касается второй проблемы, она может быть решена путем включения наблюдений с радара и параметризации микрофизики дождя в процесс получения профилей (Chan and Lee, 2015).

Наземные и спутниковые радиометры эффективно дополняют друг друга. Спутниковые измерения обеспечивают приблизительное разрешение во времени и пространстве в верхних слоях тропосферы, а наземные измерения дают высокое разрешение во времени и пространстве в пограничном слое и нижней тропосфере. Полученные наземными радиометрами наборы данных можно использовать в цифровых моделях погоды для уточнения краткосрочных прогнозов (1—12 ч) путем предоставления данных по верхним слоям воздуха в интервале между измерениями радиозондов (Caumont et al., 2016). Или же приблизительные значения радиоярких температур, полученные наземными радиометрами, могут непосредственно вводиться в цифровые модели погоды. Такой подход улучшает результаты за счет избегания ошибок, возникающих в процессе решения обратных задач для получения профиля метеорологических параметров, а также позволяет учитывать факторы, связанные с зависимостью от потока, при ассимиляции. Подобный метод включения приблизительных данных излучения спутникового радиометра непосредственно в метеорологические модели продемонстрировал несколько лет назад более точные результаты и сейчас широко используется. Для этой цели для наземных микроволновых радиометров (De Angelis et al., 2016) был разработан прямой оператор на основе RTTOV, модели радиационного переноса, которая широко применяется для ассимиляции спутниковых данных. Наземная версия RTTOV, названная RTTOV-gb (Cimini et al., 2019), успешно применяется к прототипу сети из шести микроволновых радиометров в Европе для анализа различий между наблюдениями и фоном (Н-Ф) (De Angelis et al., 2017). С помощью RTTOV-gb было проведено несколько экспериментов по одномерной вариационной ассимиляции данных (Martinet et al., 2017; Cimini et al., 2020; Martinet et al., 2020).

Основные преимущества наземных радиометров заключаются в их способности проводить непрерывные измерения по времени и в их способности измерять водозапас облаков. Непрерывные измерения температуры, влажности и жидко-капельной составляющей облаков можно использовать для уточнения прогнозов текущей погоды и краткосрочных прогнозов осадков. Изменение яркостной температуры может также помочь при наукастинге наступления конвективных событий (Chakraborty et al., 2016) и предоставить индексы прогнозов, которые используются в оперативной метеорологии (Cimini et al., 2015). Эти непрерывные измерения можно также использовать для обнаружения тенденции или времени наступления зафиксированных изменений температуры (для исследований по выбросам газов, загрязнению воздуха, по определению тепловых выбросов городов, для прогнозов неблагоприятных условий погоды и для выпуска предупреждений) (Kadyugrov et al., 2003). Было также показано, что наблюдения с помощью микроволнового радиометра могут давать оценки высоты слоя перемешивания в течение всего суточного цикла (Cimini et al., 2013; Collaud Coen et al., 2014). Данные радиометра в реальном времени также могут быть использованы для оповещения о сдвигах ветра для использования в авиации (Chan and Lee, 2013).

В ходе длительных исследований на средних, тропических и полярных широтах были широко продемонстрированы надежность и точность радиометров, обеспечивающих получение профилей метеорологических параметров (Güldner и Spänkuch, 2001; Liljegren et al., 2005 Ricaud et al., 2012; Cadeddu et al., 2013). Один из результатов 13-месячной эксплуатации (Gaffard и Hewison, 2003) демонстрируют, что значение среднего квадратического отклонения (СКО) разницы температуры, полученной радиозондом, и температуры, полученной микроволновым радиометром, находится в диапазоне 0,5 К (у поверхности земли) — 1,8 К (на высоте 5 км). Одна из первых долгосрочных оценок представлена в работе Güldner и Spänkuch (2001), на основе 18-месячной эксплуатации, в ходе которой ежедневно проводилось сравнение полученных данных радиометра

с данными четырех зондирований. Дальнейшие сравнения можно найти в работах Gaffard and Hewison (2003), Cimini et al. (2006), Löhnert and Maier (2012), Cadeddu et al. (2013) и Bianco et al. (2017).

Информационное содержание наземной радиометрии о вертикальном распределении атмосферной термодинамики заключается в дифференциальном поглощении многочастотных и многоугловых наблюдений. Для температурных профилей большая часть информации и разрешения приходится на первые 2 км, в то время как для профилей водяного пара информация распределена по всему вертикальному диапазону, но с более грубым разрешением. Для количественной оценки вертикального разрешения радиометрического профилирования используются различные методы (например, степени свободы для сигнала, разложение по сингулярным значениям, межуровневая ковариация). При использовании последнего метода вертикальное разрешение полученных профилей в диапазоне 0—3 км линейно уменьшается с высотой z примерно как $0,44z$ для температуры и $0,3 + 0,24z$ для влажности (Cimini et al., 2006). Вертикальный градиент температуры между 50 и 300 м подтвержден в сравнении с измерениями башенным методом, что дало корреляцию 0,91 (R^2) (Bianco et al., 2017).

Микроволновые радиометры обычно часто подвергаются независимой калибровке. Абсолютную калибровку рекомендуется проводить примерно через каждые шесть месяцев (Maschwitz et al., 2013); Küchler et al., 2016). Абсолютная калибровка чаще всего выполняется с помощью внешнего калибровочного образца из абсолютно черного тела, охлаждаемого жидким азотом. Абсолютная точность калибровки микроволновых радиометров исследуется в работе Maschwitz et al. (2013) с точки зрения яркостной температуры, и сообщается, что ее значения зависят от частотного канала и типа калибровки. В результате общая неопределенность яркостной температуры составляет $\sim 0,2$ – $1,0$ К. Аналогичным образом, неопределенность расчетов радиационного переноса обсуждается в Cimini et al. (2018) в зависимости от частоты и климатологии: типичные значения неопределенности составляют: i) от $\sim 0,3$ К (субарктическая зима) до почти 1,0 К (тропики) на частоте 20–26 ГГц; ii) $\sim 0,4$ К (субарктическая зима) до 1,3 К (тропики) на частотах 26–45 ГГц; iii) до 3,4 К обратно пропорционально температуре на частоте 45–54 ГГц; и iv) ниже 0,5 К на частотах 54–55 ГГц и быстро приближаются к нулю на частотах выше 55 ГГц. Представлен подробный анализ различий наблюдения минус фон (Н-Ф) с учетом неопределенностей, связанных как с приборами, так и с моделями (De Angelis et al., 2017). Основные выводы заключаются в том, что Н-Ф единообразно по всей сети и имеет типичное нормальное распределение и умеренные систематические различия. Это подтверждает, что, как правило, микроволновые радиометры работают стабильно и надежно, обеспечивая наблюдения, пригодные для оперативной ассимиляции данных.

Наконец, микроволновые радиометры обладают возможностями для синергии с рядом других приборов, что позволяет получать новую и усовершенствованную продукцию, например, с инфракрасными спектрометрами (Löhnert et al., 2009); Blumberg et al., 2015), профилометрами ветра/ радиоакустическими системами зондирования (Bianco et al., 2005; Djalalova et al., 2021), лидарами Рамана (Han et al., 1997; Foth and Pospichal, 2017), измерителями высоты облачности (Min et al., 2020) и лидарами дифференциального поглощения (Turner and Löhnert, 2021).

Наземные радиометры, дающие профили метеорологических параметров, демонстрируют существенные экономические и практические преимущества в тех случаях, когда требуются измерения температуры, влажности и водозапаса облаков нижней тропосферы с высоким временным разрешением, и в тех случаях, когда умеренное вертикальное разрешение является приемлемым.

Создаются оперативные сети микроволновых радиометров, например, NYS Mesonet в Соединенных Штатах Америки (<http://www.nysmesonet.org/networks/profiler>), E-PROFILE в Европе (Cimini et al., 2020); Rüfenacht et al., 2021), городская система метеорологических наблюдений в Сеуле, Республика Корея (Park et al., 2017).

5.2.5 Лазерные локаторы (лидары)

Электромагнитная энергия в оптическом диапазоне длин волн и вблизи него (от ультрафиолетового через видимый диапазон к инфракрасному), генерируемая лазерами, рассеивается молекулами атмосферного газа и взвешенными частицами. Такого рассеяния достаточно, чтобы применить принцип локации для проведения наблюдений в атмосфере с помощью лидара (обнаружение света и дальнометрия). Оптическое рассеяние можно в целом разделить на неупругое и упругое. Когда длина волны излучения лазера, рассеянной атмосферными составляющими, отличается от первоначальной длины волны лазера, процесс называется неупругим рассеянием. Наиболее широко применяемым процессом неупругого рассеяния, используемым в экспериментальных атмосферных лидарных системах, является рассеяние Рамана, которое представляет собой результат обмена энергией между потоком падающих фотонов и молекулярным ротационным и вибрационным состояниями рассеивающих молекул. В процессе упругого рассеяния длины падающей и рассеянной волн одинаковы. Это может быть рассеяние Рэлея или Ми, что зависит от разновидностей частиц и их размеров по отношению к длине падающей волны лазера (более подробное описание рассеяния Рэлея см. в [главе 7](#) настоящего тома). Оба эти основных процесса рассеяния могут происходить в атмосфере одновременно.

Дополнительную информацию можно почерпнуть в работах Measures (1984), Weitkamp (2005) and Foken (2021).

Большинство лидаров действует в моностатическом режиме, при котором приемник расположен в том же месте, что и лазерный передатчик. В типовой лидарной системе для излучения импульсов когерентного света в атмосферу используется импульсный лазер. Средняя мощность используемых лазеров варьирует от нескольких милливатт до десятков ватт. Оптический телескоп, установленный рядом с лазером, используется для захвата энергии обратного рассеяния. Свет, собираемый телескопом, фокусируется на фотомножитель или фотодиод. Полученная информация обычно поступает на дисплей для оперативного мониторинга и далее в компьютер для более детального анализа. Информация о дальности выводится из измерения времени между испусканием импульса и обнаружением сигнала.

Величина обратного сигнала зависит как от величины рассеяния от цели, так и от двустороннего ослабления между лидаром и целью — такое ослабление зависит от части энергии луча, рассеянной на его пути, и от поглощения атмосферными газами. Процессы рассеяния и поглощения используются в различных лидарах для проведения разнообразных измерений.

Лидары, основанные на упругом рассеянии (их называют лидарами Рэлея или Ми, либо просто лидарами), используются, главным образом, для исследований облаков и твердых частиц. Измерение высоты нижней границы облаков с помощью лидара является очень простым: можно легко выявить быстрое увеличение сигнала, которое вызывает обратное рассеяние от нижней границы облаков, и, измерив время прохождения лазерного импульса от передатчика до нижней границы облаков и обратно в приемник, можно определить высоту нижней границы облаков (см. главу 15, [том I](#) настоящего Руководства).

Лидары используются также для обнаружения взвешенных частиц, присутствующих в относительно чистом воздухе, и для составления карт некоторых структурных особенностей, таких как термическая устойчивость, высота инверсий и планетарный пограничный слой. Содержание природного аэрозоля в нижней атмосфере достаточно велико, что позволяет лидарам непрерывно измерять скорость движения воздуха в отсутствие осадков, подобно метеорологическим радиолокаторам. Наиболее широко применяемые методы измерения атмосферного ветра включают применение импульсного ветрового доплеровского лидара и когерентного доплеровского ветрового лидара непрерывного излучения, ветрового доплеровского лидара прямого обнаружения и резонансного ветрового доплеровского лидара. В [Приложении 5.B](#) описаны требования и процедуры испытаний для гетеродинных импульсных доплеровских лидаров.

Лидары можно также использовать для составления карт и измерения концентраций антропогенных частиц, например, тех, которые поступают в атмосферу из промышленных дымовых труб. Лидарные наблюдения внесли весомый и хорошо документированный вклад в исследования концентраций стратосферных аэрозольных частиц, на которые оказывают сильное влияние крупные вулканические извержения. Эти частицы играют важную роль в глобальном радиационном балансе (Leblanc et al., 2019).

Гораздо труднее получить количественные данные об облаках ввиду изменений формы и распределения капель, содержания воды, различий между водой, льдом и смешанными фазами, а также свойств взвешенных частиц и аэрозолей. Действительно, такие измерения требуют комплексных многопараметрических исследовательских систем, проводящих несколько измерений одновременно с использованием гипотез, описывающих оптические свойства среды, и сложных математических методов преобразования данных. Деполяризационный лидар широко используется для различения фаз или типов облаков и аэрозолей, поскольку несферические частицы, такие как кристаллы льда, вулканический пепел и минеральная пыль, вносят в обратное рассеяние деполяризованную составляющую. Более подробную информацию о деполяризационном лидаре см. в Sassen (1991, 2005).

Лидар дифференциального поглощения (ДИАЛ) основан на использовании сильной зависимости изменения коэффициента поглощения атмосферных газов от длины волны. Система ДИАЛ обычно использует лазер, который может быть настроен на две близко расположенные частоты, одна из которых энергично поглощается частицами газа, а другая нет. Различие в результатах измерений как функция дальности может быть использовано для оценки концентрации исследуемого газа. Это наиболее перспективный метод дистанционного зондирования для определения состава атмосферы, успешно использовавшийся для измерения концентраций водяного пара, диоксида серы, диоксида азота и в особенности озона.

Применение Рамановского рассеяния представляет особый интерес ввиду того, что рассеянная радиация сдвинута по частоте, и этот сдвиг зависит от вида молекул (линии Стокса). Мощность сигнала обратного рассеяния связана с концентрацией этих молекул. Рамановские лидары не требуют специальной длины волны или настройки лазера; длины волн лазера могут быть выбраны в части спектра, свободной от атмосферного поглощения. С помощью измерения спектра Рамана можно проводить измерения выборочных составляющих атмосферы с пространственным разрешением, что использовалось для получения тропосферных профилей водяного пара, молекулярных азота и кислорода и малых газовых составляющих атмосферы. Основные недостатки сводятся к малой чувствительности на большом расстоянии ввиду малых поперечных сечений рассеяния и потребности в лазерах высокой мощности, работающих в ультрафиолетовом диапазоне или на волнах видимого спектра, что небезопасно для глаз при практическом применении.

Лидарные системы предоставляют большой объем полезной информации для научных исследований. Доплеровские лидары, предоставляющие информацию о ветре, имеют ряд применений в качестве оперативных инструментов (см. [Добавление С к Приложению 5.В](#)). Вместе с тем, у лидарных систем есть недостатки, что связано с тем, что они относительно дороги и для их разработки, установки и эксплуатации требуется весьма квалифицированный персонал. Кроме того, некоторые лидары могут работать лишь при определенных условиях, таких как ночные измерения либо отсутствие осадков. Измерители высоты облачности работают по тому же принципу, что и лидары, и широко используются для определения нижней границы облаков в аэропортах, поскольку они относительно недороги и просты в эксплуатации.

5.2.6 Глобальная навигационная спутниковая система

Главной целью ГНСС является определение местоположения, однако поскольку атмосферные характеристики влияют на распространение сигнала ГНСС, с ее помощью можно получать и метеорологическую информацию. Время задержки, которым характеризуется сигнал, исходящий от спутника и измеряемый приемником на Земле, связано с отражаемостью вдоль траекторий сигнала и, таким образом, связано также с температурой и влажностью вдоль этой траектории.

Метеорологическая информация, полученная с наземной ГНСС, требует наличия наземной сети приемников ГНСС, передачи данных и средства обработки данных. Как правило, сеть приемников ГНСС устанавливается для целей проведения наблюдений за земной поверхностью, и, как результат, было установлено тесное сотрудничество с национальными учреждениями по проведению наблюдений в нескольких странах. Это сотрудничество обычно основано на совместном использовании площадок и/или совместном использовании информации.

Дополнительная информация о методах обработки данных имеется в публикации *de Haan (2006)*.

5.2.6.1 Описание Глобальной навигационной спутниковой системы

ГНСС состоит из трех сегментов: космический, наземный и пользовательский сегменты. Космический сегмент включает ряд находящихся на орбите спутников. В настоящее время полностью функционируют четыре системы: Глобальная система определения местоположения Соединенных Штатов Америки (ГСОМ), Глобальная навигационная спутниковая система Российской Федерации (ГЛОНАСС), Навигационная спутниковая система Китая «Бейдоу» (ССБ) и система Галилео Европейского союза. Спутники ГНСС передают сигналы с временным кодированием на ряде несущих частотах волн, которые являются разными для разных спутниковых систем.

Принцип работы ГНСС является одинаковым для всех четырех систем. Бортовые атомные часы контролируют все сигнальные компоненты на спутниках. Наземный сегмент контролирует корректировку орбиты спутников и обеспечивает передачу в эфир эфемерид, которые распространяются в пользовательский сегмент через навигационное сообщение сигнала ГНСС. Антенна и приемник ГНСС (наземного или космического базирования) составляют пользовательский сегмент. Приемник сравнивает кодированный по времени сигнал со спутников ГНСС с показаниями своих собственных внутренних часов и, на основе чего приемник может рассчитывать псевдо-расстояния (P) до каждого находящегося в поле зрения спутника. Когда проводятся наблюдения как минимум четырех псевдо-расстояний, то приемник может рассчитывать свои позицию и временную ошибку. Точность стандартного метода позиционирования, использующего кодированные сигналы времени, составляет порядка 3—5 м.

Основными измеряемыми величинами ГНСС являются псевдо-расстояние (P) и несущая фаза (L). Например, сигналы ГСОМ передаются в эфир на двух разных частотах: а именно: L1 (1 575,42 МГц) и L2 (1 227,60 МГц). На обеих частотах передаются измеряемые величины P и L . Таким образом, у двухчастотного приемника на период дискретизации приходится четыре измеряемых величины. Уравнения 5.1 и 5.2 представляют как P , так и L , выраженные в виде суммы всех привнесенных ошибок, составляющих измерения ГНСС, т. е.:

$$P = \rho + c(dt_{\text{rec}} - dt_{\text{sat}}) + \delta_{\text{rel}} + L_{\text{atm}} + I + K + M + \delta_{\text{tide}} + \varepsilon_P \quad (5.1)$$

$$L = \rho + c(dt_{\text{rec}} - dt_{\text{sat}}) + \delta_{\text{rel}} + L_{\text{atm}} - I + N\omega_L + K + M + \delta_{\text{tide}} + \varepsilon_L \quad (5.2)$$

где c — это скорость света; ρ — геометрическая дистанция между фазовым центром спутника и фазовым центром приемника; dt_{sat} — сдвиг спутникового датчика времени; dt_{rec} — сдвиг датчика времени приемника; L_{atm} — задержка в тропосфере или общая

наклонная задержка, обусловленная рефрактивным характером атмосферы; I — задержка в ионосфере вдоль трассы луча; δ_{rel} — релятивистическая ошибка; K — инструментальная погрешность приемника; M — эффект многолучевости; δ_{tide} — позиционная погрешность приемника, обусловленная полярными приливами и отливами, приливно-отливными явлениями твердой оболочки Земли и океанической нагрузкой; N — обозначение неоднозначности (относится только к измерениям несущей фазы, уравнение 5.2), ω_L — вклад одной длины волны, обусловленный круговой поляризацией сигнала; и ε — немодулируемая погрешность из-за шумов.

Измеряемые величины имеют разные уровни неопределенности и разные характеристики. В частности, измерения фаз имеют уровень шума в несколько миллиметров и являются весьма точными по сравнению с псевдо-расстоянием, которое имеет неопределенность в несколько метров. Фаза несущей частоты является первичной и самой важной измеряемой величиной при оценке параметра низкой неопределенности, однако наблюдаемые величины псевдо-расстояния лучше подходят для наблюдения и устранения конкретных погрешностей, связанных с приемником (многолучевое распространение и т. д.). Для удаления ионосферного эффекта первого порядка используется линейное сочетание однородной наблюдаемой величины (P или L), измеряемой на двух разных частотах. Другие методы, такие как двойное дифференцирование, могут удалять временные ошибки спутников и приемников. Это требует, однако, тщательной обработки данных ГНСС.

5.2.6.2 Тропосферный сигнал Глобальной навигационной спутниковой системы

Превышение траектории сигнала в атмосфере вызвано рефракцией и изгибом сигнала, обусловленных градиентами показателя преломления n . Согласно принципу Ферма, эта чрезмерная траектория выражается формулой:

$$L_{atm} = \int_s n ds - D + \Delta S \approx \int_s (n - 1) ds \quad (5.3)$$

где $D (= \int ds)$ — это геометрическое расстояние, а ΔS — чрезмерная траектория, обусловленная фактором изгиба; последний может не учитываться для углов места более 10 градусов. Преломляющая способность N определяется как $N = 106 (n - 1)$ и, согласно Smith and Weintraub (1953) и Thompson et al. (1986):

$$\begin{aligned} N &= k_1 \rho R_d + (k_2 R_v - k_1 R_d + R_v / T k_3) \rho_w \\ &= N_h + N_w \end{aligned} \quad (5.4)$$

для нейтральной атмосферы. В данном уравнении ρ — это плотность воздуха (кг м^{-3}); ρ_w — плотность водяного пара (кг м^{-3}); T — температура (K) и $R_d = 287,05 \text{ Дж кг}^{-1} \text{ K}^{-1}$ и $R_v = 461,51 \text{ Дж кг}^{-1} \text{ K}^{-1}$ — это газовые постоянные для сухого воздуха и водяного пара. Эмпирическими постоянными являются $k_1 = 77,6 \text{ К} \cdot \text{гПа}^{-1}$, $k_2 = 70,4 \text{ К} \cdot \text{гПа}^{-1}$ и $k_3 = 373 \, 900 \text{ К}^2 \text{ гПа}^{-1}$ (Thayer, 1974). Первый член в уравнении 5.4 — это гидростатическая рефракция N_h , а второй член называется влажной рефракцией N_w .

В рамках так называемого сетевого решения данных ГНСС тропосферная задержка картируется в зенитном направлении для всех углов места и азимутальных углов. Таким образом снижается число неизвестных и может быть точно определена позиция приемника. Закартированная наклонная общая задержка по вертикали именуется общей задержкой по вертикали (ZTD). При расчете точного местоположения может быть получена оценка атмосферной составляющей сигнала. ZTD может быть представлена в виде суммы гидростатической задержки по вертикали (ZHD) и влажной задержки по вертикали (ZWD) (или в более лучшем варианте, а именно негидростатической задержки по вертикали). Интегралы при гидростатической и влажной рефракции в вертикальном направлении (выраженные в метрах) составляют:

$$\text{ZHD} = 10^{-6} \int_z N_h dz \quad (5.5)$$

$$\text{ZWD} = 10^{-6} \int_z N_w dz \quad (5.6)$$

5.2.6.3 Интегральное содержание водяного пара

Измеренное значение общей задержки по вертикали (ZTD) сигнала ГНСС можно разложить на две составляющие: гидростатическую задержку по вертикали (ZHD) и влажную задержку по вертикали (ZWD). ZHD — это задержка, возникающая из-за недипольной составляющей преломляющей способности ряда атмосферных газов, включая водяной пар, а ZWD — это составляющая преломляющей способности от дипольного момента воды (единственного распространенного газа в атмосфере, обладающего дипольным моментом). ZHD можно смоделировать следующим образом (Elgered et al., 2004):

$$ZHD = \frac{(2.2779 \pm 0.0024)P_s}{f(\lambda, H)} \quad (5.7)$$

$$f(\lambda, H) = 1 - 0.000266 \cos(2\lambda) - 0.0028H \quad (5.8)$$

где P_s общее давление (гПа) на поверхности Земли, λ широта, а H высота поверхности над эллипсоидом. Вычисление ZWD выполняется просто:

$$ZWD = ZTD - ZHD \quad (5.9)$$

Соотнести ZWD с содержанием пара в атмосфере можно с помощью ряда уравнений, подробно описанных в работе Bevis et al. (1994):

$$IWV = \frac{ZWD}{\Pi} \quad (5.10)$$

$$\Pi = \frac{\rho_w R_v \left(\frac{k_3}{T_m} + k_2' \right)}{10^6} \quad (5.11)$$

$$k_2' = k_2 - \frac{M_w}{M_D} k_1 \quad (5.12)$$

где ρ_w плотность жидкой воды, R_v удельная газовая постоянная для водяного пара, T_m средневзвешенная по водяному пару температура атмосферы, M_w и M_D молярные массы водяного пара и сухого воздуха соответственно, а k_1 , k_2 и k_3 физические константы из широко используемой формулы для определения преломляющей способности (Smith and Weintraub, 1953; Boudouris, 1963). Более подробную информацию о значениях k см. в Bevis et al. (1994) и в табл. 2.1. можно рассчитать по вертикальному профилю давления водяного пара (ρ_w) и физической температуре (T):

$$\int \frac{\rho_w(S)}{T(S)} dS = T_m \int \frac{\rho_w(S)}{T(S)^2} dS \quad (5.13)$$

T_m также можно смоделировать с помощью профилей температуры и влажности, оцениваемых по температурам поверхности или рассчитываемых по продуктам реанализа или моделям ЧПП (см., например, Wang et al., 2005). Для продукта данных ИВП ГНСС Опорной аэрологической сети ГСНК (ГРУАН) T_m рекомендуется рассчитывать на основе профилей температуры и влажности, полученных в результате анализа или реанализа моделей ЧПП, с временной, горизонтальной и вертикальной интерполяцией на время и положение точки ГНСС, в соответствии с рекомендациями Heise et al. (2009).

5.2.6.4 Неопределенности измерений

В работе Ning et al. (2016) был проведен обширный обзор методов расчета неопределенности измерений ИВП-ГНСС для поддержки разработки продукта данных ГРУАН ИВП-ГНСС. На все измерения ИВП-ГНСС действует несколько источников

Таблица 2.1 Физические константы k_1 , k_2 и k_3 , обнаруженные и обоснованные разными авторами

Справочная литература	k_1 (K zPa ⁻¹)		k_2 (K zPa ⁻¹)		k_3 (10 ⁵ K ² zPa ⁻¹)	
	Значение	Ошибка	Значение	Ошибка	Значение	Ошибка
Smith and Weintraub (1953)	77,607	0,013	71,6	8,5	3,747	0,031
Thayer (1974)	77,604	0,014	64,79	0,08	3,776	0,004
Hasegawa and Stokesbury (1975)	77,600	0,032	69,40	0,15	3,701	0,003
Bevis et al. (1994)	77,60	0,05	70,4	2,2	3,739	0,012

Источник: Таблица изменена по Bevis et al. (1994)

погрешности измерений. Присутствует неопределенность в оценке ZTD, которая в первую очередь зависит от ошибок в орбитах спутников ГНСС. Неопределенность ZHD зависит от неопределенности измерений давления на грунт (Ning et al., 2016). Наконец, при пересчете из ZWD в ИВП добавляются неопределенности, связанные с T_m и физическими константами из широко используемой формулы для определения преломляющей способности (k_1 , k_2 и k_3). Эти неопределенности могут быть случайными или систематическими. Поскольку ожидаемое среднее значение случайных ошибок измерений равно нулю, влияние таких ошибок уменьшается по мере увеличения числа измерений. Систематические ошибки измерений нельзя исключить путем усреднения, но они могут возникать в определенное время, например при смене антенны, или появляться медленно, например в результате многолучевого распространения сигнала из-за медленно растущей растительности на месте измерений. При расчете неопределенности измерений ИВП-ГНСС необходимо учитывать все эти источники ошибок.

Авторы работы Ning et al. (2016) обнаружили, что в суммарной погрешности измерения ИВП преобладают неопределенности в ZTD и на их долю приходится более 75% от общей неопределенности ИВП. Влияние неопределенности, связанной с коэффициентом пересчета между ИВП и ZWD, пропорционально количеству водяного пара и несколько увеличивается при влажных погодных условиях. Неопределенности, присущие ZTD, появляются из-за ошибок в орбитах спутников ГНСС, неопределенностей, возникающих при расчете задержки в ионосфере, многолучевости и функций отображения сигнала, а также ошибок, связанных с антеннами. Ning et al. (2016) обнаружили, что рассчитанные суммарные неопределенности ZTD для трех пунктов ГРУАН находятся на том же уровне, что и неопределенность 1σ ZTD (4 мм), рассчитанная Международной службой ГНСС. По оценкам Ning et al. (2016), общая неопределенность ИВП, составляет ~0,6 кг м⁻². На основе сравнений с другими измерениями Wang et al. (2007) пришли к выводу, что среднеквадратичная ошибка ИВП-ГНСС составляет менее 3 мм. ГРУАН рекомендован ряд процедур для минимизации общей неопределенности продуктов ИВП-ГНСС (Wang et al., 2019).

5.3 КОНТАКТНЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

5.3.1 Методы измерений при помощи шаров-зондов

Более подробно техники измерений с помощью метеорологических шаров-зондов описываются в [главе 8](#) тома III настоящего Руководства.

Радиозонды можно применять для измерения профилей температуры, влажности и ветра в слое от поверхности Земли до атмосферного пограничного слоя и нижних слоев тропосферы. Системы радиозондов подробно описаны в [главе 12 тома I](#) настоящего Руководства.

Шаропилотные наблюдения можно использовать для получения данных о ветре в атмосферном пограничном слое с помощью оптических теодолитов или радиолокаторов слежения. В главе 13, [тома I](#) настоящего Руководства представлено более общее описание средств для измерения ветра.

При проведении зондирований в нижней тропосфере желательно, чтобы скорость подъема шара была невелика, что позволяет иметь большее число точек измерений по вертикали. Уменьшение скорости подъема достигается либо с помощью тормозного парашюта, либо подбором оптимального соотношения веса и объема оболочки. Поскольку шары-зонды должны достигать лишь ограниченной высоты, можно использовать шаропилотную оболочку или небольшой метеорологический шар-зонд. В остальном процесс зондирования и обработки данных почти тот же самый, что и при обычном радиозондировании.

5.3.2 Специально оснащенные вышки и мачты

Специально оснащенные вышки и мачты используются для многих целей, особенно для целей оценки распространения атмосферного загрязнения. Этот вопрос обсуждается в работе Panofsky (1973).

Для некоторых целей высота мачты может достигать 100 м, а при мониторинге загрязнения воздуха и осуществлении программ контроля она должна превышать высоту основных источников загрязнения минимум на 50 м.

Измерение температуры, влажности и ветра следует производить на нескольких уровнях (как минимум на двух-трех), самый нижний из которых должен находиться на уровне стандартной метеорологической будки, расположенной поблизости от вышки или мачты. Число уровней зависит от поставленной задачи и от высоты вышки или мачты. Измерение только на двух уровнях не обеспечивает получения информации для построения вертикального профиля метеорологических элементов и поэтому используется очень ограниченно. Как правило, число уровней измерения при исследовательских работах больше, чем при стандартных наблюдениях.

Обычно данные обрабатываются и представляются автоматически вместе с разностями между уровнями, которые характеризуют метеорологические условия. Если данные предназначены для непосредственного использования специалистами, не являющимися метеорологами, например, специалистами, отвечающими за контроль поддержания уровней загрязнения воздуха в безопасных пределах, они часто подвергаются дальнейшей обработке на компьютере для получения производных величин, легко применимых к решаемой задаче.

Как правило, для измерения на вышках и мачтах используются следующие датчики:

- a) температура: электрические термометры сопротивления или термопары в защитных экранах, аспирационные или не аспирационные;
- b) влажность: психрометры, электрохимические или электромеханические датчики в защитных экранах;
- c) ветер: чашечные и лопастные вертушки, звуковые или тепловые устройства.

Все датчики должны иметь линейные или линеаризованные характеристики, а их временные постоянные должны быть достаточно малы, чтобы полученные данные адекватно отражали локальные изменения метеорологических элементов.

Важно, чтобы конструкция башни или мачты не оказывала значительного влияния на датчики и результаты измерений. Для открытых конструкций длина стационарных или выдвижных стрел должна составлять не менее двух метров; при этом желательно, чтобы длина стрелы давала возможность разместить датчики на расстоянии от вышки или мачты,

равном как минимум десяти диаметрам вышки. Для жестких конструкций или в случае невозможности соблюдения требуемой длины стрел на каждом уровне необходима двойная система, при которой стрелы располагаются на противоположных сторонах вышки или мачты и длина их должна превышать диаметр конструкции минимум в три раза. Измерения в конкретный момент производятся только теми датчиками, которые расположены с наветренной стороны.

Иногда, в особых ситуациях, вышки можно использовать для получения профилей метеорологических элементов, не устанавливая фиксированных датчиков; при этом используется упрощенный метод зондирования. Как можно выше укрепляется блок с веревкой, достигающей уровня земли. С помощью этой веревки посредством ручной или механической лебедки радиозонд перемещается по вертикали на требуемые уровни. С радиозонда, оснащенного ветровыми датчиками, данные передаются на соответствующую приемную наземную систему. При этом можно достичь существенно большего вертикального разрешения и получить более подробную информацию, чем при установке стрелы, причем можно также определить высоты с наиболее значимыми характерными особенностями. Однако длительное наблюдение возможно только на одном уровне.

При некоторых погодных условиях высота башни может оказаться недостаточной для точного определения протяженности распространения загрязнения. В таких случаях, если в пределах 50 км от башни нет станции радиозондирования, должно быть установлено специальное оборудование для проведения локальных зондирований возле башни или мачты до высоты около 3 000 м. Помимо главной цели полученные данные могут дополнять информацию основной аэрологической сети, а также служить для более детального изучения местных погодных явлений.

Измерительное оборудование на башнях требует периодической проверки высококвалифицированным обслуживающим персоналом, которому следует обращать особое внимание на состояние и функционирование датчиков, регистраторов, а также соединительных проводов, вилок и розеток, подвергающихся воздействию внешних погодных условий.

5.3.3 Специально оснащенные привязные аэростаты

Привязные аэростаты, в основном, применяются для измерения профилей температуры, влажности и ветра (и их краткосрочных изменений) от земной поверхности до высоты около 1 500 м, а также для длительного исследования метеорологических условий на одном или нескольких выбранных уровнях. Необходимые для этого датчики подвешиваются в одном или нескольких специальных контейнерах под аэростатом или прикрепляются зажимом к тросовому кабелю. Их сигналы передаются на Землю по радио или по проводам, вмонтированным в тросовый кабель. Эта методика описана в работе Thompson (1980).

В системах привязных аэростатов, как правило, используются либо большие (приблизительно 600 м³), либо малые (приблизительно 10—100 м³) аэростаты. Малые аэростаты обычно используются для получения профилей, а большие для производства измерений на нескольких уровнях. Оболочки для привязных аэростатов должны конструироваться таким образом, чтобы обеспечивать хорошую обтекаемость и достаточную подъемную силу. Они обычно наполняются гелием. Большие аэростаты должны поднимать груз до 50 кг (в дополнение к тросовому кабелю) на высоту 1 500 м. Должна быть обеспечена возможность проведения измерений при скорости ветра до 5 м с⁻¹ у поверхности Земли и до 15 м с⁻¹ на высотах рабочего диапазона. Во избежание обрыва тросовый кабель большой оболочки должен выдерживать нагрузку 2 000—3 000 кг (200—300 кг для малых оболочек).

Запуски привязных аэростатов должны производиться в соответствии с национальными правилами обеспечения безопасности полетов авиации. С этой целью, а также для удобства обслуживания персоналом настоятельно рекомендуется использовать

оболочки хорошо различных цветов, а также предупредительные огни в ночное время. Наличие автоматического устройства для быстрого выпуска газа из оболочки обязательно, наличие металлизированной радиолокационной мишени, подвешенной под аэростатом, желательно.

Основными факторами, влияющими на возможность запусков привязных аэростатов, являются скорость ветра на высотах, турбулентность вблизи поверхности Земли и молнии.

Лебедки, использующиеся для управления аэростатом, могут быть ручными или электрическими. Должна быть обеспечена подача кабеля по крайней мере двумя скоростями (например, 1 и 2 м с⁻¹). Кроме того, лебедка должна быть оснащена тормозом, счетчиком длины кабеля и измерителем натяжения. Для защиты от атмосферных разрядов лебедка должна быть заземлена, независимо от того, электрическая она или нет.

Использование кабелей для передачи сигналов датчика на Землю нежелательно по нескольким причинам. Как правило, предпочтительно использовать специальные радиозонды. Такие радиозонды позволяют получить лучшее разрешение, чем используемые в нормальных условиях для свободных полетов. Датчики для измерения температуры и влажности должны иметь защиту от солнечной радиации и дождя, но в то же время обеспечивающую необходимую вентиляцию. Для измерения скорости и направления ветра необходимы дополнительные датчики.

Основные требования сводятся к следующему¹:

<i>Переменная</i>	<i>Рабочий диапазон</i>	<i>Разрешение</i>
Давление	1 050 до 850 гПа	±0,5 гПа
Температура	+40 °С до -20 °С	±0,1 К
Влажность	100 % до 20 (или 10) % ОВ	±2 %ОВ
Скорость ветра	0,5 до 15 м с ⁻¹	±0,5 м с ⁻¹
Направление ветра	0° до 360°	±1°

Для телеметрии может использоваться одна из стандартных частот радиозондов; как правило, выбирается частота 400 МГц. Максимальная масса, включая массу батареи, должна быть заведомо меньше грузоподъемности аэростата, т. е., как правило, не более 5 кг. Радиозонд подвешивается под оболочкой на расстоянии от нее не менее трех ее диаметров в устойчивом положении так, чтобы обеспечивались надлежащие защита и вентиляция.

Основная трудность, с которой сталкиваются при измерениях турбулентных, а не средних значений величин, связана с влиянием вибрации кабеля и движением аэростата при измерениях. Для таких измерений должна применяться специальная методика.

В состав наземного оборудования должны входить приемник и регистратор. Данные обычно обрабатываются с помощью небольшого компьютера.

Зондирование может производиться во время подъема или спуска аэростата либо непрерывно, либо с остановками на выбранных уровнях. Для нескольких нижних уровней высоту можно определить по длине вытравленного троса, но на более высоких уровнях этот способ весьма приблизителен, поэтому необходим какой-то другой метод определения высоты. Ее можно определить путем вычисления с помощью уравнения

¹ Данные требования к измерениям профиля в пограничном слое отличаются от требований к приземным измерениям, содержащихся в приложении 1.А главы 1 тома I настоящего Руководства.

гидростатики, используя наблюдаемое распределение давления, температуры и влажности. Таким образом, приращение в геопотенциальных метрах от уровня n до уровня $n+1$ выражается формулой:

$$29,27 T_v \ln(p_n / p_{n+1}) \quad (5.14)$$

где T_v — среднее значение виртуальных температур на уровнях n и $n+1$; а p_n и p_{n+1} — два последовательных значения давления. Если нужен перевод геопотенциальных метров в геометрические, то это легко сделать, используя Смитсонианские метеорологические таблицы; однако, как правило, этого не требуется. Высота барометра, расположенного на станции, берется в этих расчетах за исходный уровень.

Если наблюдение метеорологических переменных ведется методом площадок, следует производить несколько серий измерений на каждом уровне. Время, требуемое для стабилизации датчиков, составляет от 2 до 3 минут. В этом случае полный цикл зондирования занимает от получаса до часа. Для всех радиозондов непосредственно перед использованием обязательно проводится проверка в контрольной будке для определения разностей в показаниях с барометром и аспирационным психрометром. Подобную проверку следует проводить также сразу после выполнения зондирования. Как и при регулярных подъемах радиозондов, данные на уровне расположения станции следует определять не по результатам радиозондирования, а традиционными приборами в стандартной метеорологической будке.

При обработке данных зондирования на каждом уровне определяются средние значения давления, температуры и влажности. Для скорости ветра средние значения следует рассчитывать за период 100 с или 120 с. Если направление ветра не измеряется непосредственно, то его можно оценить приблизительно по ориентации продольной оси аэростата по отношению к истинному северу. Погрешность этого метода составляет $\pm 30^\circ$.

Следует подчеркнуть, что наблюдатели должны извещать диспетчерские службы авиации о своих планах и получать разрешение на каждое зондирование или на серию зондирований с использованием привязных аэростатов.

ПРИЛОЖЕНИЕ 5.А. НАЗЕМНОЕ ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ВЕТРА — РАДИОЛОКАЦИОННЫЙ ВЕТРОВОЙ ПРОФИЛОМЕТР

В этом приложении приводится текст общего стандарта ИСО/ВМО. Он также опубликован с идентичным содержанием как ИСО 23032:2022.

ВВЕДЕНИЕ

Радиолокационный ветровой профилометр, который также называют радиолокатором профиля ветра, радаром для измерения профиля ветра, атмосферным радиолокатором или доплеровским радиолокатором для чистого воздуха (далее сокращенно РПВ), — это прибор для измерения высотных профилей скорости ветра в чистом воздухе. РПВ обнаруживает эхосигналы, создаваемые возмущениями показателя преломления радиоволн, в масштабе, равном половине длины волны радара (брэгговская длина волны). Механизм рассеяния радиоволн в чистом воздухе был теоретически и экспериментально изучен в 1960-х годах. С 1970-х годов ведется разработка крупных доплеровских радиолокаторов для наблюдения за ветром и турбулентностью в мезосфере, стратосфере и тропосфере (радиолокаторы МСТ). Благодаря тому, что они позволяют измерять ветер и турбулентность с отличным временным и высотным разрешением, такие радиолокаторы значительно способствовали описанию и уточнению динамических процессов в атмосфере.

Разработка РПВ, в основу которых положены радиолокаторы МСТ, ведется в основном с 1980-х годов. РПВ предназначены для измерения скорости ветра преимущественно в тропосфере, включая атмосферный пограничный слой. В РПВ используется такой же принцип измерения, как и в радиолокаторах МСТ, но РПВ часто меньше по размеру, чем типичный радиолокатор МСТ. РПВ могут измерять профили ветра как в ясной, так и в облачной атмосфере.

Для мониторинга и прогнозирования метеорологических явлений метеорологические учреждения построили общенациональные оперативные сети РПВ. Оперативные РПВ способствуют повышению точности прогнозов погоды путем ассимиляции их ветровых продуктов в моделях численного прогнозирования погоды, используемых метеорологическими службами. Ветровая продукция, полученная с помощью действующих РПВ, распространяется по всему миру. Помимо этого, РПВ применяются для измерения профилей ветра вблизи аэропортов с целью создания или улучшения предупреждений о сдвиге ветра. Использование РПВ может улучшить способность аэропорта обеспечивать безопасный вылет и посадку воздушных судов. РПВ также используются для анализа или прогнозирования распространения загрязняющих веществ. Кроме того, РПВ широко применяются в государственных учреждениях и различных отраслях промышленности, в том числе на химических заводах, шахтах и электростанциях, для контроля уровня выбросов или расчета траекторий накаливания во время чрезвычайных ситуаций. Высококачественные ветровые продукты РПВ также широко используются в атмосферных исследованиях. Таким образом, РПВ являются незаменимым средством для непрерывного по времени и высоте наблюдения за профилями ветра. За счет дополнительного использования систем радиоакустического зондирования РПВ могут измерять высотные профили виртуальной температуры.

Для обеспечения высокого качества ветроэнергетической продукции РПВ следует проектировать, производить и обслуживать, опираясь на самые современные знания. В целях обеспечения измерительных возможностей РПВ в настоящем приложении приводятся руководящие принципы по проектированию, производству, установке и техническому обслуживанию РПВ.

1. СФЕРА ОХВАТА

В данном приложении содержатся руководящие принципы проектирования, изготовления, установки и технического обслуживания РПВ. В нем изложено следующее:

- Принцип измерения ([раздел 5](#)). Описаны отражатели, создающие эхосигналы, и методы измерения скорости ветра. Объяснение принципа измерения в основном приводится для того, чтобы предоставить информацию, необходимую для изложения руководящих принципов в разделах с [6](#) по [11](#).
- Руководящие принципы для системы РПВ ([раздел 6](#)). Указаны частота, аппаратные средства, программное обеспечение и обработка сигналов. Эти руководящие принципы в основном применяются при разработке и производстве аппаратного и программного обеспечения РПВ.
- Руководящие принципы производительности системы ([раздел 7](#)). Описаны разрешение измерений, определение дальности, оценка чувствительности радиолокатора и точность измерений. Эти руководящие принципы можно использовать для оценки эффективности измерений при проектировании и эксплуатации системы РПВ.
- Руководящие принципы контроля качества (КК) при цифровой обработке данных ([раздел 8](#)).
- Руководящие принципы для продуктов измерений и формат данных ([раздел 9](#)). Определены продукты измерений, получаемые с помощью РПВ, и их уровни данных. Также описаны руководящие принципы по форматам файлов данных.
- Руководящие принципы установки ([раздел 10](#)) и технического обслуживания ([раздел 11](#)).

В данном приложении не ставится задача дать подробное описание принципа измерения, систем РПВ и областей применения РПВ. Для получения более подробной информации по этим вопросам пользователям следует обратиться к техническим изданиям, таким как [1], [2] и [3] из списка справочной литературы.

РПВ называют по-разному (например радиолокатор профиля ветра, радиолокационный ветровой профилометр, радар для измерения профиля ветра, атмосферный радиолокатор или доплеровский радиолокатор для чистого воздуха). Следует допускать использование условных обозначений для РПВ.

2. НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ

Настоящее приложение не содержит нормативных ссылок.

3. ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

В настоящем приложении не приводятся термины и определения.

ИСО и МЭК ведут следующие терминологические базы данных для использования в стандартизации:

- Онлайн-платформа ИСО, доступна по адресу <https://www.iso.org/obp>
- Electropedia МЭК, доступно на сайте <https://www.electropedia.org/>

4. УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

4.1 Условные обозначения

c	скорость света ($\approx 3,0 \cdot 10^8 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$)
C_n^2	константа структуры коэффициента преломления
f_{Nyq}	частота Найквиста
f_r	средний сдвиг доплеровской частоты эхосигнала
G_{ant}	усиление антенны в децибелах
L_p	коэффициент потерь, вызванный формированием импульсов
n	показатель преломления радиоволн
N_{beam}	количество направлений лучей антенны
N_{coh}	количество когерентных интегрирований; в данном приложении N_{coh} определяется как число, исключающее N_{pseq}
N_{data}	количество элементов во временном ряду I/Q
N_{freq}	количество передаваемых частот
N_{incoh}	количество некогерентных интегрирований
N_{pseq}	количество последовательностей импульсов
N_{subp}	количество субимпульсов, используемых при сжатии импульсов с фазовой модуляцией
T_{IPP}	интервал между импульсами
P_{echo}	мощность эхосигнала
P_N	мощность шумов приемника
P_n	мощность шумов в доплеровском спектре
p_n	мощность шумов в доплеровском спектре на элемент разрешения доплеровской скорости
P_p	пиковая выходная мощность передатчика
P_t	пиковая выходная мощность антенны
S_{echo}	доплеровский спектр эха
u	скорость зонального ветра
v	скорость меридионального ветра
V_{pp}	размах напряжения
V_r	радиальная доплеровская скорость
V_s	облучаемый объем

$\mathbf{V}_{\text{wind}}$	вектор ветра
w	вертикальная составляющая скорости ветра
Δr	разрешающая способность по дальности
η	отражательная способность объема
λ	длина волны радара
$\tau_{3\text{dB}}$	ширина временного интервала между двумя точками снижения на 3 дБ от пиковой точки
τ_d	период времени, в течение которого генерируется сигнал передачи
τ_p	ширина передаваемого импульса
H	эрмитов оператор (комплексное транспонирование)
T	надстрочный знак, обозначающий транспонирование матрицы
$*$	комплексное сопряжение

4.2 Сокращения

BUFR	двоичная универсальная форма для представления метеорологических данных
А/Ц	аналого-цифровой
АПП	адаптивное подавление помех
АЦП	аналого-цифровой преобразователь
В/В	ввод/вывод
ДКЛ	доплеровское качание луча
ИБП	источник бесперебойного питания
ИМИ	интервал между импульсами
ИСА	индикатор скорость-азимут
ИЧО	интерферометрия в частотной области
КК	контроль качества
КООС	когерентный осциллятор
КРИ	когерентное радиолокационное формирование изображений
КСВН	коэффициент стоячей волны по напряжению
КШ	коэффициент шума
МСЭ	Международный союз электросвязи
МШУ	малошумящий усилитель

НВЧМ	незатухающая волна с частотной модуляцией
ОВЧ	очень высокая частота
ОНММ	ограниченная направлением минимизация мощности
ОНММ-ОН	ОНММ с ограничениями по норме
ОП	обратные потери антенны
ОСШ	отношение сигнал-шум
ПКА	полный корреляционный анализ
ППВМ	программируемая пользователем вентильная матрица
ПЧ	промежуточная частота
РА	разнесённые антенны
РПВ	радиолокатор профиля ветра, радиолокационный ветровой профилометр, радар для измерения профиля ветра, атмосферный радиолокатор или доплеровский радиолокатор для чистого воздуха
РЧ	Радиочастота
СТАЛО	стабильный (стабилизированный) локальный осциллятор
УВЧ	ультравысокая частота
ФИД	формирование изображений по дальности
Ц/А	цифро-аналоговый
ЦПС	цифровой процессор сигналов
ЯМА	Японское метеорологическое агентство

5. ПРИНЦИП ИЗМЕРЕНИЯ

5.1 Спектральные параметры эхосигнала

Характеристики всех эхосигналов РПВ обычно оцениваются по характеристикам доплеровского спектра. Спектральный анализ обычно применяется для оценки конечного набора параметров, таких как отношение сигнал/шум (ОСШ), доплеровское смещение и ширина спектра (спектральная ширина). Особое значение для РПВ имеет эхосигнал, возникающий в результате рассеяния в чистом воздухе (эхосигнал в чистом воздухе). Более подробную информацию об эхосигнале в чистом воздухе см. в разделе [5.2.1](#).

Примечания:

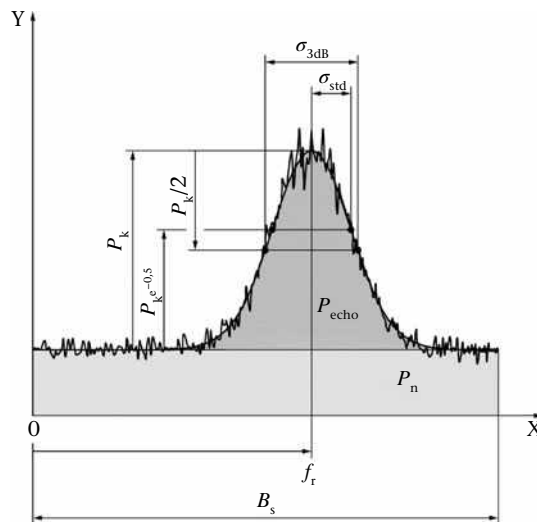
1. Обработка сигнала в реальном времени для получения доплеровского спектра описана в разделах [6.2.2](#) и [6.2.6](#).
2. Также часто используется термин «ширина спектра», который взаимозаменяем с термином «спектральная ширина». Эти два термина имеют одинаковое значение.

Распределение частот эхосигнала содержит информацию о радиальной доплеровской скорости (V_r) и об отклонении ветра, вызванном турбулентностью. На рисунке 5.A.1

показан пример доплеровского спектра. Доплеровский спектр эхосигнала (S_{echo}) и шума, показанный на рисунке 5.А.1, был получен с помощью численного моделирования. При численном моделировании были получены доплеровские спектры, состоящие из S_{echo} и белого шума. Мощность шума в доплеровском спектре выражается через P_n . Предполагается, что S_{echo} имеет гауссово распределение и что каждая точка спектра S_{echo} имеет распределение χ^2 с двумя степенями свободы. Ширина полосы частот доплеровского спектра выражается через B_s . Полученные доплеровские спектры были проинтегрированы, и на график нанесен доплеровский спектр после интегрирования (т.е. некогерентное интегрирование). Таким образом, дисперсия шума по B_s меньше квадрата мощности шума на элемент разрешения доплеровской скорости (p_n^2).

Дисперсия шума является одним из основных факторов, определяющих чувствительность приемника РПВ. Подробнее о некогерентном интегрировании и чувствительности радиолокатора см. в разделах 6.2.2 и 7.3 соответственно.

В общем случае предполагается, что S_{echo} имеет нормальное распределение. Это предположение обычно применяется для эхосигнала в чистом воздухе. В этом предположении при определении спектральных параметров учитываются только моменты нулевого, первого и второго порядка эхосигнала. Это предположение не следует путать с предположением, что принимаемый сигнал является реализацией одного или нескольких гауссовских стохастических процессов, к которым относятся и рассеяние радиоволн, и, конечно, некоррелированный (белый) шум. В случае отклонений от этого предположения можно рассмотреть моменты более высокого порядка. Шум, создаваемый в приемнике (шум приемника), обычно можно считать белым шумом. Подробнее о шумах приемника см. в разделе 6.2.5.4.



Обозначения:

X — Доплеровская скорость
Y — Интенсивность

Примечания:

1. Определения символов, не указанных в списке обозначений, приведены в тексте.
2. Тонкая сплошная кривая — это пример доплеровского спектра, который содержит доплеровский спектр S_{echo} и белый шум. Толстая сплошная кривая представляет собой сумму P_n и идеализированного S_{echo} , который имеет нормальное распределение и не имеет возмущений. Идеализированные S_{echo} и P_n заштрихованы темным и светлым цветом, соответственно. Мощность идеализированного S_{echo} обозначается P_{echo} . Стрелками указаны f_r , σ_{std} , $\sigma_{3\text{dB}}$ и максимальная интенсивность идеализированного S_{echo} (p_k).

Рисунок 5.А.1. Пример доплеровского спектра и спектральных параметров

К основным параметрам, описывающим эхосигнал, относятся его мощность (P_{echo}), V_r и ширина спектра. Они называются спектральными параметрами. V_r рассчитывается по среднему доплеровскому сдвигу частоты эхосигнала (f_r). P_{echo} и f_r также являются моментами нулевого и первого порядка от S_{echo} , соответственно. Ширина спектра, определяемая как стандартное отклонение (σ_{std}), представляет собой квадратный корень из момента второго порядка S_{echo} (см. рисунок 5.A.1). P_{echo} , f_r и σ_{std} выражаются следующим образом:

$$P_{\text{echo}} = \int S_{\text{echo}}(f) df \quad (5.A.1)$$

$$f_r = \frac{\int f S_{\text{echo}}(f) df}{\int S_{\text{echo}}(f) df} \quad (5.A.2)$$

$$\sigma_{\text{std}} = \sqrt{\frac{\int (f - f_r)^2 S_{\text{echo}}(f) df}{\int S_{\text{echo}}(f) df}} \quad (5.A.3)$$

где f — доплеровская частота.

Отношение между f_r и V_r выражается следующим образом:

$$V_r \approx -\frac{\lambda}{2} f_r \quad (5.A.4)$$

В уравнении 5.A.4 V_r считается положительной, если она направлена от антенны. Однако, если использовать для V_r то же определение знака, что и для f_r , то V_r можно считать положительной, если она направлена к антенне. В любом случае, направление V_r должно быть четко определено при проектировании и изготовлении РПВ, чтобы предотвратить возможные ошибки при проектировании, изготовлении, эксплуатации и техническом обслуживании РПВ. В данном приложении V_r считается положительной, если она направлена от антенны.

Ширина спектра также может быть определена как полная ширина полумощности ($\sigma_{3\text{dB}}$) или полуширина полумощности эхосигнала (то есть, $\sigma_{3\text{dB}}/2$). Если предполагается, что S_{echo} имеет нормальное распределение, то $\sigma_{3\text{dB}}$ можно рассчитать по следующему соотношению:

$$\sigma_{3\text{dB}} = 2\sqrt{2\ln 2} \sigma_{\text{std}} \quad (5.A.5)$$

Поскольку ширину спектра можно выразить в соответствии с вышеупомянутыми определениями, необходимо дать ее определение в явном виде. Следует отметить, что ширина спектра определяется не только возмущением ветра, вызванным турбулентностью, но и содержит эффекты расширения, обусловленные угловым и вертикальным расширением облучаемого объема^[4]. Подробная информация об облучаемом объеме изложена в [разделе 7.1.2](#).

При оценке спектральных параметров также оценивается P_n . ОСШ выражается следующим образом:

$$SNR = \frac{P_{\text{echo}}}{P_n} \quad (5.A.6)$$

При цифровой обработке данных для оценки спектральных параметров и P_n обычно используется мощность шума на элемент разрешения доплеровской скорости (p_n). p_n выражается следующим образом:

$$p_n = P_n \frac{\Delta f}{B_s} \quad (5.A.7)$$

где Δf — разрешение по частоте доплеровского спектра (т.е. интервал элементов разрешения доплеровской частоты). Следует отметить, что интерференция от других источников радиоизлучения, загрязняющая принимаемый сигнал, обычно зависит от частоты. Таким образом, загрязнение, вызванное радиоволновой интерференцией, может приводить к зависимости шума от частоты. Подробная информация об интерференции от источников радиоизлучения приводится в разделах [5.2.4](#) и [10.6](#).

Если предположить, что S_{echo} имеет нормальное распределение, а ОСШ бесконечно, то ошибку оценки доплеровской скорости или ширины спектра ε_v можно оценить с помощью следующего уравнения:

$$\varepsilon_v = K_v \left(\frac{\sigma_v}{T_c} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5.A.8)$$

где:

K_v — коэффициент;

σ_v — ширина спектра, определяемая как стандартное отклонение в м·с⁻¹;

T_c — период измерения в секундах.

Если направление луча антенны изменяется после сбора доплеровского спектра (то есть после $N_{\text{pseq}} N_{\text{coh}} N_{\text{data}}$ передач и приемов) или после сбора всех доплеровских спектров, используемых в некогерентном интегрировании (то есть после $N_{\text{pseq}} N_{\text{coh}} N_{\text{data}} N_{\text{incoh}}$ передач и приемов), $T_c = T_{\text{IPP}} N_{\text{pseq}} N_{\text{coh}} N_{\text{data}} N_{\text{incoh}}$. При изменении направления луча антенны от импульса к импульсу $T_c = T_{\text{IPP}} N_{\text{beam}} N_{\text{pseq}} N_{\text{coh}} N_{\text{data}} N_{\text{incoh}}$. Подробную информацию об изменении направления луча антенны со временем см. в разделе 6.2.3.2.5.

K_v определяется следующим образом:

$$K_v = k_{\text{err}} \left(\frac{\lambda}{2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5.A.9)$$

где:

k_{err} — коэффициент;

λ — длина волны радиолокатора;

Уравнения 5.A.8 и 5.A.9 получены из уравнений 13 и 14 в справочной литературе [5], соответственно. Значение k_{err} из таблицы 1 справочной литературы [5] приведено в таблице 5.A.1.

Таблица 5.A.1. Значение k_{err}

Параметр	Метод наименьших квадратов	Метод моментов
Доплеровская скорость	0,63	0,38
Ширина спектра	0,60	0,24

Оценка ошибок для спектральных параметров с учетом ОСШ описывается в разделах 6.3, 6.4 и 6.5 справочной литературы [2].

5.2 Источники принимаемых сигналов

5.2.1 Турбулентное рассеяние и частичное отражение

Наиболее важной характеристикой РПВ является способность обнаруживать эхосигнал в чистом воздухе. Благодаря этому РПВ может определять вертикально разрешенные профили вектора ветра по измеренному доплеровскому сдвигу эхосигнала в чистом воздухе. Существует два основных механизма, вызывающих эхосигналы в чистом воздухе: турбулентное рассеяние из-за атмосферной турбулентности и частичное отражение от горизонтально слоистой атмосферы. Частичное отражение также называют рассеянием

Френеля. Атмосферная турбулентность вызывает возмущению n , а возмущение n с масштабом в половину λ (то есть брэгговской длиной волны) служит источником рассеяния радиоволн в чистом воздухе.

Примечание: Эхосигнал в чистом воздухе — это отражение в результате рассеяния радиоволн, вызванное изменениями показателя преломления радиоволн n , и оно не включает рассеяние от твердых мишеней в воздухе (таких как гидрометеоры, насекомые, птицы и самолеты).

n в нейтральной (неионизированной) атмосфере определяется следующим образом:

$$n = 1 + 7,76 \times 10^{-5} \frac{p}{T} + 3,73 \times 10^{-1} \frac{e}{T^2} \quad (5.A.10)$$

где:

p — атмосферное давление в кПа;

T — температура воздуха в атмосфере в К;

e — парциальное давление водяного пара в гПа.

Если возмущение n изотропно, то турбулентное рассеяние также изотропно.

Константа структуры показателя преломления определяется следующим образом:

$$\overline{[n(r + \delta r) - n(r)]^2} = C_n^2 |\delta r|^{2/3} \quad (5.A.11)$$

где r — произвольное положение, а δr — небольшое расстояние между двумя разнесенными точками. Поскольку T и e возмущаются при турбулентности, а n зависит от них, C_n^2 существенно изменяется в зависимости от атмосферных условий, определяющих T и e (см. Уравнение 5.A.10).

Частота РПВ обычно выбирается так, чтобы турбулентное рассеяние происходило в инерционном интервале турбулентности. Для РПВ обычно используются частоты от 50 МГц до 3 ГГц.

В инерционном интервале энергия переходит от самых крупных вихрей к самым мелким в соответствии с инерционным (и невязким) механизмом. Инерционный интервал существует между внутренним масштабом турбулентности (I_0) и масштабом длин плавучести (L_b). I_0 — это шкала для определения области перехода между вязким и инерционным интервалами, а L_b — это шкала для определения области перехода между инерционным интервалом и интервалом плавучести. В интервале плавучести турбулентные вихри становятся более плоскими и анизотропными. В вязком интервале на мельчайшие вихри сильно влияет вязкость и кинетическая энергия преобразуется в тепло. Переход от инерционного интервала к вязкому объясняет, почему максимальный достижимый охват высоты для РПВ уменьшается в сторону меньших длин волн. Вязкий интервал также называют рассеивающим. С точки зрения чувствительности радиолокатора не являются предпочтительными длинные волны (низкие частоты), брэгговские длины волн которых находятся в интервале плавучести, и короткие длины волн (высокие частоты), брэгговские длины волн которых находятся в вязком интервале. Более подробную информацию об инерционном интервале см. в разделах 3.4.2 и 7.3.3 справочной литературы [1].

Известно, что горизонтально стратифицированные слои с резкими вертикальными градиентами n дают частичное отражение. Интенсивность эхосигнала в результате частичного отражения указывает на сильную зависимость от зенитного угла. Она достигает максимума вблизи зенита и быстро уменьшается с увеличением зенитного угла.

Коэффициент частичного отражения ρ определяется как:

$$|\rho|^2 = \frac{1}{4} \left| \int_{-l/2}^{+l/2} \frac{1}{n} \frac{dn}{dz} e^{-jkz} dz \right|^2 \quad (5.A.12)$$

где:

l — толщина стратифицированного слоя;

z — высота над уровнем моря;

k — волновое число, заданное как $k = 4\pi/\lambda$.

Более подробную информацию о частичном отражении см. в разделе 3.4.3 справочной литературы [1]. Частичное отражение не наблюдается на УВЧ и микроволновом диапазонах^[1].

Интенсивность эхосигнала в чистом воздухе определяется силой возмущения n , вызванного турбулентностью, или силой вертикального градиента n , вызванного горизонтально стратифицированными слоями.

5.2.2 Эхосигнал при осадках

Источниками эхосигналов также являются дождевые капли, градины, кристаллы снега, льда и многофазные частицы в осадках (эхосигнал осадков). Интенсивность эхосигнала осадков часто сравнима с интенсивностью эхосигнала в чистом воздухе в диапазоне ОБЧ и обычно превышает интенсивность эхосигнала в чистом воздухе в диапазоне УВЧ.

Если в доплеровском спектре присутствует как эхосигнал осадков, так и эхосигнал в чистом воздухе, то измеренная доплеровская скорость может представлять собой сочетание ветра (скорости чистого воздуха) и конечной скорости гидрометеоров относительно земли. В этом случае, если не удастся отделить влияние рассеяния, нельзя правильно рассчитать вертикальный ветер. Тем не менее, горизонтальный ветер обычно можно рассчитать точно, поскольку скорость горизонтального перемещения небольших гидрометеоров является хорошим косвенным показателем горизонтального ветра. РПВ, работающие в диапазоне УВЧ, обычно измеряют горизонтальную скорость ветра на большей высоте при осадках, чем в чистом воздухе.

5.2.3 Помехи

Мешающие эхосигналы называются помехами. Поскольку помехи загрязняют доплеровский спектр, они могут значительно снижать качество результатов измерений, полученных с помощью РПВ.

Ниже перечислены источники помех.

- Помехи от источников, закрепленных на земле, которые называются помехами на земной поверхности. Основными источниками помех на местности являются грунт, трава, деревья на холмах и горах, а также высокие металлические конструкции (такие как вышки, здания и линии электропередач). Помехи на земной поверхности могут быть распределены по большой площади. Хотя средняя доплеровская частота помех на земной поверхности равна нулю, колебания источника помех могут расширить доплеровский спектр наземных помех. Особенно в том случае, если источник помех на земной поверхности имеет колебательный характер (например, трава, деревья или линии электропередач), пик помех на земной поверхности в доплеровском спектре может значительно расшириться при сильном приземном ветре.

- Помехи от вращающихся объектов. Основными источниками являются ветряные турбины и вращающиеся антенны. Помехи от них значительно распространяются в широком диапазоне частот принимаемого доплеровского спектра.
- Помехи на поверхности моря, которые называются помехами на морской поверхности. Поскольку помехи на морской поверхности распределены по обширной территории, они обычно распространяются по принимаемому доплеровскому спектру как по дальности, так и по частоте. Интенсивность и доплеровское распространение помех на морской поверхности зависит от приземного ветра.
- Помехи от движущихся источников на суше или в море. Основными источниками являются автотранспорт, поезда и суда. Помехи от автотранспорта часто распространяются в широком диапазоне частот доплеровского спектра, поскольку дорожное движение осуществляется в двух противоположных направлениях. Расположение и доплеровская скорость помех от поездов могут быстро меняться со временем. Помехи от судов накладываются на помехи на морской поверхности.
- Помехи от летающих объектов. Основными источниками являются летательные аппараты (самолеты и вертолеты), птицы, летучие мыши и насекомые, и их скорость полета меняется с течением времени. Помехи от самолета могут значительно распространяться по принимаемому доплеровскому спектру из-за большой доплеровской скорости и интенсивности. Помехи от вертолетов также могут распространяться по широкому диапазону частот принимаемого доплеровского спектра из-за высокой скорости вращения их лопастей. Значительным источником помех также являются птицы. Перелетные птицы могут летать на высоте до нескольких тысяч метров, и, как правило, они летают ночью. Периоды интенсивной миграции птиц могут представлять собой серьезную проблему для измерений РПВ, если не учитывать этот тип помех должным образом при обработке сигнала. Но даже в этом случае в данных о ветре могут возникнуть пробелы. Источником помех могут быть и насекомые в воздухе.

Помехи следует тщательно учитывать при проектировании, установке и цифровой обработке данных. При обследовании места установки (см. [10.5](#)) следует изучить окружающую обстановку с точки зрения помех. Уменьшить помехи и интерференцию можно с помощью ограждения, предназначенного для ослабления радиоволн в диапазоне частот РПВ (далее экранирующее ограждение). Подробнее об экранирующих ограждениях см. в разделах [6.2.3.4](#) и [10.5](#).

Еще одним способом уменьшения помех служит контроль качества при цифровой обработке данных (см. [пункт 8](#)). Адаптивное подавление помех (АПП), при котором используются антенные подрешетки, представляет собой метод адаптивного уменьшения помех за счет управления боковым лепестком приемной антенны. АПП описывается в разделе [6.3.3](#).

В ОВЧ-диапазоне метеоры в верхней мезосфере и электромагнитные неоднородности в спорадическом слое E также могут служить источником помех при возникновении искажения дальности. Искажение дальности можно предотвратить, выбрав достаточно большой интервал между импульсами (ИМИ) так, чтобы максимальный измеряемый диапазон был больше высоты, на которой могут находиться метеоры и электромагнитные неоднородности. Однако следует отметить, что предотвращение искажения дальности может привести к потере чувствительности радиолокатора за счет снижения коэффициента заполнения передачи. Источником помех также может стать молния.

5.2.4 ***Интерференция от источников радиоизлучения***

Когда радиоволны от искусственного источника радиоизлучения загрязняют сигналы, принимаемые РПВ, они часто снижают качество продуктов измерений, получаемых с помощью РПВ. Как радиостанции, так и машины, излучающие электромагнитные волны,

являются источниками радиоволн, способных вызывать интерференцию. Интерференция, загрязняющая принимаемый сигнал, обычно зависит от частоты. Даже если частота интерференции отличается от частоты РПВ, перекрестная модуляция в приемнике и частотное искажение выборки данных могут вызвать загрязнение основной полосы радишумом. При проектировании и установке необходимо учитывать меры по снижению интерференции. При первоначальном обследовании места установки следует изучить радиоволновую обстановку (см. 10.6). Контрмеры по снижению интерференции также описаны в разделе 10.6.

Источником помех также может стать излучение радиоволн от молнии^[6].

5.3 Методы измерения скорости ветра

5.3.1 Общие аспекты

Вектор ветра V_{wind} , обозначающий вертикальный и горизонтальный поток поля ветра, задается следующим образом:

$$V_{wind} = (u \quad v \quad w)^T \quad (5.A.13)$$

где:

u — зональная скорость ветра;

v — меридиональная скорость ветра;

w — вертикальная составляющая скорости ветра;

T — надстрочный знак, обозначающий транспонирование матрицы. Для определения V_{wind} используются два метода: метод доплеровского качания луча (ДКЛ) и метод разнесенных антенн (РА). В методе ДКЛ используется набор радиальных доплеровских скоростей (V_r), измеренных несколькими лучами антенн. В методе РА применяется автокорреляция и кросс-корреляция сигналов, полученных несколькими приемными антеннами.

5.3.2 Метод доплеровского качания луча

5.3.2.1 Получение вектора ветра с помощью нескольких антенных лучей

Метод ДКЛ позволяет получить V_{wind} методом наименьших квадратов или прямым вычислением. Предполагается, что поле ветра горизонтально однородно в области, охватываемой лучами антенны. Таким образом, зенитные углы наклонных лучей обычно не превышают нескольких десятков градусов. Однородность ветра также предполагается на вертикальном масштабе, соизмеримом с разрешением по дальности (см. раздел 7.1.1). Еще одно неявное предположение метода ДКЛ заключается в том, что (среднее) поле ветра является стационарным в течение периода измерений.

Теперь поясним метод получения V_{wind} по методу наименьших квадратов.

Отношение между вектором ветра и V_r выражается следующим образом:

$$AV_{wind} = V_r = (V_{r1}, V_{r2}, \dots, V_{rN})^T \quad (5.A.14)$$

где:

N — количество лучей антенны, используемых для вычисления V_{wind} ;

V_{ri} — радиальная доплеровская скорость, измеренная i -м лучом антенны ($i = 1, \dots, N$);

A — матрица, связывающая V_{wind} с V_r .

A выражается следующим образом:

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \sin\phi_1 \sin\theta_1 & \cos\phi_1 \sin\theta_1 & \cos\theta_1 \\ \sin\phi_2 \sin\theta_2 & \cos\phi_2 \sin\theta_2 & \cos\theta_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \sin\phi_N \sin\theta_N & \cos\phi_N \sin\theta_N & \cos\theta_N \end{pmatrix} \quad (5.A.15)$$

где:

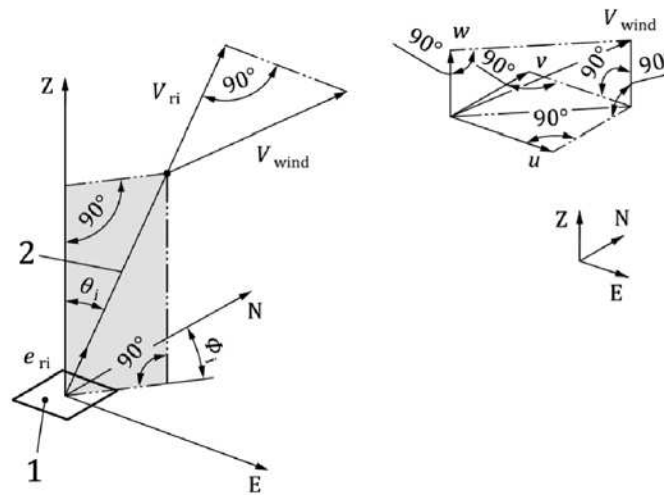
ϕ_i — азимутальный угол i -го луча антенны ($i = 1, \dots, N$);

θ_i — зенитный угол i -го луча антенны ($i = 1, \dots, N$).

Единичный вектор направления i -го луча антенны (e_{ri}) выражается через:

$$e_{ri} = (\sin\phi_i \sin\theta_i, \cos\phi_i \sin\theta_i, \cos\theta_i)^T \quad (5.A.16)$$

Рисунок 5.A.2 представляет собой схематическую иллюстрацию, поясняющую V_{ri} , ϕ_i , θ_i , u , v и w .



Обозначения:

- 1 Антенна
- 2 Направление i -го луча антенны

- E Направление на восток
- N Направление на север
- Z Вертикальное направление

Примечания:

1. Определения символов, не указанных в списке обозначений, приведены в тексте.
2. И e_{ri} и вертикальная ось лежат на затененной плоскости.

Рисунок 5.A.2. Схематическое изображение, поясняющее V_{ri} , ϕ_i , θ_i , u , v и w

$\mathbf{V}_{\text{wind}}$ можно получить путем минимизации $V_r - \mathbf{A}\mathbf{V}_{\text{wind}}^2$. Для решения задачи наименьших квадратов, минимизирующей $V_r - \mathbf{A}\mathbf{V}_{\text{wind}}^2$, можно применить разложение по сингулярным значениям^[7]. Тогда $\mathbf{A}$ можно выразить как:

$$\mathbf{A} = \mathbf{U}\mathbf{D}\mathbf{V}^T \quad (5.A.17)$$

где:

- $\mathbf{U}$ — ортогональная матрица с N строками и N столбцами;
- $\mathbf{V}$ — ортогональная матрица с 3 строками и 3 столбцами;
- $\mathbf{D}$ — матрица с N строками и 3 столбцами.

Элементы $\mathbf{D}$ называются сингулярными значениями $\mathbf{A}$.

Из уравнений 5.A.14 и 5.A.17, $\mathbf{V}_{\text{wind}}$ выражается через:

$$\mathbf{V}_{\text{wind}} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T V_r = \mathbf{A}^+ V_r = \mathbf{V} \mathbf{D}^{-1} \mathbf{U}^T V_r \quad (5.A.18)$$

где $\mathbf{A}^+$ — псевдообратная матрица от $\mathbf{A}$.

Когда зенитные углы одинаковы для всех лучей антенны, а азимутальные углы одинаково разнесены, вектор ветра получается следующим образом:

$$\mathbf{V}_{\text{wind}} = \begin{pmatrix} \frac{2}{N \sin \theta} \sum_{i=1}^N \sin \phi_i V_{ri} \\ \frac{2}{N \sin \theta} \sum_{i=1}^N \cos \phi_i V_{ri} \\ \frac{1}{N \cos \theta} \sum_{i=1}^N V_{ri} \end{pmatrix} \quad (5.A.19)$$

где θ — зенитный угол лучей антенны.

При использовании метода наименьших квадратов необходимо использовать V_{ri} на одной и той же высоте. Однако при разных зенитных углах и одинаковом интервале дискретизации для лучей антенн высота облучения не одинакова. Изменяя интервал дискретизации таким образом, чтобы компенсировать разницу в зенитных углах, можно собирать принимаемые сигналы на одинаковых диапазонах. Альтернативным способом обеспечения совпадения высот облучения является интерполяция V_{ri} по диапазону.

Поскольку $\mathbf{V}_{\text{wind}}$ имеет три составляющие (u , v , и w), количество лучей антенны должно быть равно трем или более. Увеличение числа лучей антенны уменьшает ошибку получения $\mathbf{V}_{\text{wind}}$ из-за ошибок определения V_{ri} . С другой стороны, ухудшается временное разрешение. При изменении направления луча антенны от импульса к импульсу частота Найквиста (f_{Nyq}) уменьшается за счет увеличения числа лучей антенны. При разработке и эксплуатации РПВ следует учитывать как преимущества, так и недостатки увеличения числа антенных лучей.

5.3.2.2 Метод индикатора «скорость-азимут»

Метод индикатора «скорость-азимут» (ИСА) — это метод расчета $\mathbf{V}_{\text{wind}}$ (u , v , и w) с помощью конического луча радиолокатора. Рисунок 5.A.3 представляет собой схематическую иллюстрацию, поясняющую метод ИСА. В методе ИСА все лучи радиолокатора имеют одинаковый зенитный угол. Метод ИСА имеет следующие предпосылки:

- w равномерна на определенной высоте;
- горизонтальный ветер меняется линейно в горизонтальной плоскости.

u_x — скорость линейного увеличения u вдоль направления $x \left(= \frac{\partial u}{\partial x} \right)$;

u_y — скорость линейного увеличения u вдоль направления $y \left(= \frac{\partial u}{\partial y} \right)$;

v_x — скорость линейного увеличения v вдоль направления $x \left(= \frac{\partial v}{\partial x} \right)$;

v_y — скорость линейного увеличения v вдоль направления $y \left(= \frac{\partial v}{\partial y} \right)$.

Уравнение 5.A.20 можно выразить как:

$$V_r = a_0 + \sum_{n=1}^2 (a_n \cos n\phi + b_n \sin n\phi) \quad (5.A.21)$$

a_0, a_1, b_1, a_2 и b_2 — коэффициенты Фурье, которые вычисляются с помощью:

$$a_0 = w_0 \cos \theta_e + \frac{1}{2} (u_x + v_y) r \sin^2 \theta_e \quad (5.A.22)$$

$$a_1 = v_0 \sin \theta_e \quad (5.A.23)$$

$$b_1 = u_0 \sin \theta_e \quad (5.A.24)$$

$$a_2 = \frac{1}{2} (v_y - u_x) r \sin^2 \theta_e \quad (5.A.25)$$

$$b_2 = \frac{1}{2} (v_x + u_y) r \sin^2 \theta_e \quad (5.A.26)$$

Горизонтальная скорость ветра v_h вычисляется на основе a_1 и b_1 следующим образом:

$$v_h = \frac{\sqrt{a_1^2 + b_1^2}}{\sin \theta_e} = \sqrt{u_0^2 + v_0^2} \quad (5.A.27)$$

Горизонтальное направление ветра δ вычисляется с помощью:

$$\delta = \tan^{-1} \frac{b_1}{a_1} = \tan^{-1} \frac{u_0}{v_0} \quad (5.A.28)$$

где δ — направление горизонтального ветра по отношению к северу.

Уравнения с (5.A.20) по (5.A.28) основаны на уравнениях с (4.28) по (4.36) в справочной литературе [1]. Обратите внимание, что в уравнениях с (5.A.20) по (5.A.28) используется зенитный угол, а в уравнениях с (4.28) по (4.36) из справочной литературы [1] — угол возвышения.

Вычисление вектора ветра можно упростить, приняв, что u , v и w равномерны на определенной высоте. Вычисления при предположении равномерности u , v и w описаны в разделе 5.3.2.1.

5.3.2.3 Пятилучевой метод доплеровского качания луча

Часто применяется частный случай пятилучевого метода ДКЛ. Он обеспечивает удобный способ получения $\mathbf{V}_{\text{wind}}$ путем прямого вычисления. При пятилучевом методе ДКЛ используется один луч антенны, направленный вертикально, и четыре наклонных луча, которые имеют равные азимутальные углы (интервал азимутальных углов равен 90°) и одинаковый зенитный угол. Рисунок 5.A.4 представляет собой схематическую иллюстрацию, поясняющую пятилучевой метод ДКЛ с использованием лучей антенны, направленных в вертикальном, северном, восточном, южном и западном направлениях.

На основе V_{rV} , V_{rN} , V_{rE} , V_{rS} и V_{rW} компоненты V_{wind} (u , v и w) вычисляются следующим образом:

$$u = \frac{V_{rE} - V_{rW}}{2 \sin \theta_e} \quad (5.A.29)$$

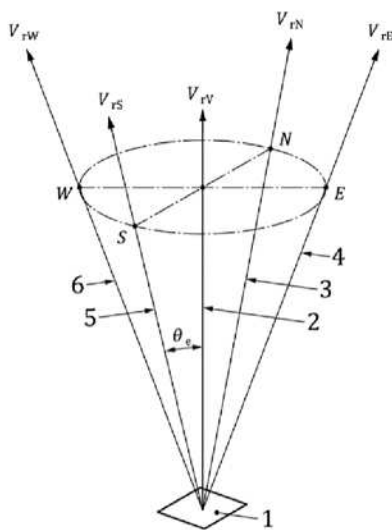
$$v = \frac{V_{rN} - V_{rS}}{2 \sin \theta_e} \quad (5.A.30)$$

$$w = V_{rV} \quad (5.A.31)$$

Часто бывает невозможно направить наклонные лучи антенны точно на север, восток, юг и запад из-за ограничений, связанных с установкой. Даже в таких случаях можно получить горизонтальный вектор ветра с двумя ортогональными элементами и w с помощью метода расчета, аналогичного показанному на рисунке 5.A.4 и в уравнениях с (5.A.29) по (5.A.31). u и v легко вычислить путем дальнейшего применения операции вращения к полученному горизонтальному вектору ветра с двумя ортогональными элементами.

5.3.3 Метод разнесенных антенн

В методе разнесенных антенн (РА) используется одна передающая антенна и несколько приемных антенн. В методе РА вектор ветра определяется с помощью автокорреляции и кросс-корреляции сигналов, полученных приемными антеннами. В этом разделе описывается общая схема метода РА. Более подробная информация о методе РА приведена в справочной литературе [8] и в разделе 9.3 справочной литературы [3]. Принцип метода РА показан на рисунке 5.A.5. Интерференция между эхосигналами создает дифракционную картину на земле (см. рис. а)). Приемные антенны регистрируют



Обозначения:

- | | |
|--|---------------------------------------|
| 1 Антенна | 4 Направление восточного луча антенны |
| 2 Направление вертикального луча антенны | 5 Направление южного луча антенны |
| 3 Направление северного луча антенны | 6 Направление западного луча антенны |

Примечания:

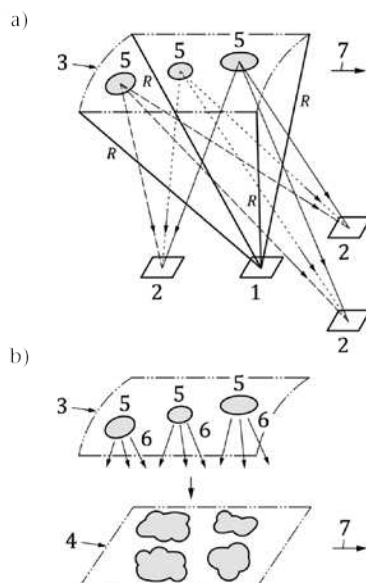
1. N, E, S, W обозначают направления на север, восток, юг и запад, соответственно.
2. Все лучи антенны имеют одинаковый зенитный угол, θ_e .
3. Радиальная доплеровская скорость, измеренная вертикальным, северным, восточным, южным и западным лучами антенны, обозначается V_{rV} , V_{rN} , V_{rE} , V_{rS} и V_{rW} соответственно.

Рисунок 5.A.4. Схематическая иллюстрация, поясняющая пятилучевой метод ДКЛ

дифракционную картину (см. рис. b)). Дифракционная картина перемещается со временем из-за адвекции отражателей ветром, и движение дифракционной картины проявляется в кросс-корреляции между сигналами, получаемыми приемными антеннами.

Метод РА может применяться при определенных условиях. Его можно использовать, если время корреляции отражателей существенно больше длительности измерения. В целом, метод РА позволяет получить только горизонтальную скорость ветра при предположении, что вертикальным движением отражателей можно пренебречь. Поскольку для определения горизонтальной скорости ветра нужны как минимум две базовые линии между приемными антеннами, необходимо использовать три или более приемных антенн. Если w не удастся получить с помощью техники РА, ее можно получить, оценив доплеровскую скорость сигналов, полученных приемными антеннами.

Простой способ получить скорость горизонтального ветра заключается в том, чтобы использовать временную задержку кросс-корреляции. Для этого метода используется гипотеза замороженной турбулентности Тейлора, которая заключается в предположении, что адвекция поля турбулентности может быть полностью обусловлена средним потоком ветра. Обратите внимание, что скорость распространения дифракционной картины на земле в два раза выше горизонтальной скорости ветра.



Обозначения:

- | | |
|--|--|
| 1 Антенна-передатчик | 4 Дифракционная картина эхосигналов на земле |
| 2 Приемные антенны | 5 Отражатель |
| 3 Поле рассеяния, охватываемое антенной-передатчиком и приемными антеннами | 6 Рассеянные радиоволны |
| | 7 Ветер |

Примечания:

1. Рисунок а) представляет собой схематическую иллюстрацию, поясняющую связь между полем рассеяния в атмосфере и соответствующей дифракционной картиной, измеренной на земле.
2. На рисунке б) показаны передача, генерация и прием эхосигналов в методе РА. R на рисунке б) — расстояние от передающей антенны, показано поле рассеяния в точке R . Хотя поле рассеяния также изменяется и по вертикали, для упрощения иллюстрации вертикальное распределение поля рассеяния не показано. Дифракционная картина образуется в результате интерференции между эхосигналами, полученными на земле.

Рисунок 5.А.5. Принцип метода РА

При реальных измерениях корреляция дифракционной картины уменьшается со временем. Полный корреляционный анализ (ПКА) — это метод, позволяющий определить горизонтальную скорость ветра с учетом этой декорреляции. В ПКА корреляционная функция между принятыми сигналами выражается следующим образом:

$$\left| \rho(\xi_{ij}, \eta_{ij}, \tau) \right| = f \left(A(\xi_{ij} - V_x \tau)^2 + B(\eta_{ij} - V_y \tau)^2 + K\tau^2 + 2H(\xi_{ij} - V_x \tau)(\eta_{ij} - V_y \tau) \right) \quad (5.A.32)$$

$$V_x = 2u$$

$$V_y = 2v$$

где:

$\rho(\xi_{ij}, \eta_{ij}, \tau)$ — смоделированная вариация коэффициента корреляции;

$f(z)$ — произвольная вещественная функция, удовлетворяющая $f(0) = 1$ и $f(z) \leq f(0)$;

ξ_{ij} — разность положений между i -й и j -й приемными антеннами вдоль оси x (см. Рисунок 5.A.6);

η_{ij} — разность положений между i -й и j -й приемными антеннами вдоль оси y (см. Рисунок 5.A.6);

τ — временная задержка корреляционной функции;

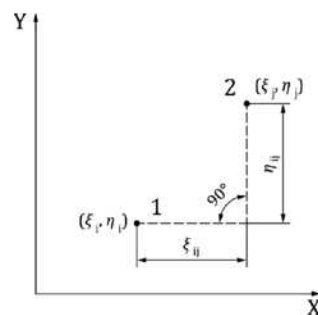
V_x — скорость перемещения дифракционной картины вдоль оси x ;

V_y — скорость перемещения дифракционной картины вдоль оси y ;

u — зональная скорость ветра;

v — меридиональная скорость ветра;

A, B, K и H — постоянные величины.



Обозначения:

X	Ось x	1	i -я приемная антенна
Y	Ось y	2	j -я приемная антенна

Примечание:

Определение символов см. в тексте.

Рисунок 5.A.6. Координаты, используемые для объяснения ПКА

Горизонтальную скорость ветра (u и v) можно получить путем определения таких значений A, B, K, H, V_x и V_y , для которых $\rho(\xi_{ij}, \eta_{ij}, \tau)$ ближе всего соответствует измеренным значениям корреляции. $\rho(0,0,\tau)$ — автокорреляция полученного сигнала.

6. СИСТЕМА РПВ

6.1 Частота

Международный союз электросвязи (МСЭ) выпустил рекомендации по распределению частот для РПВ^[9;10]. Для РПВ, используемых метеорологической службой, частота должна соответствовать этим рекомендациям.

К выделенным частотам относятся следующие:

- 46–68 МГц в соответствии с п. S5.162A
- 440–450 МГц
- 470–494 МГц в соответствии с п. S5.291A
- 904–928 МГц только в Районе 2
- 1270–1295 МГц
- 1300–1375 МГц

Регулирование выходной мощности передатчика, центральной частоты, точности частоты, занимаемой полосы частот и побочного излучения осуществляется путем лицензирования радиостанций. Необходимо соблюдать лицензионные требования радиостанции.

Для РПВ, использующих импульсы передачи, обычно осуществляется формирование сигнала передаваемого импульса, чтобы выполнить лицензионные требования к занимаемой полосе для радиостанции. Формирование сигнала приводит к потере чувствительности радиолокатора (см. 6.2.4.3), причем потеря чувствительности радиолокатора уменьшается с увеличением занимаемой полосы.

6.2 Аппаратура и программное обеспечение

6.2.1 Основные компоненты

На рисунке 5.А.7 показаны следующие основные компоненты РПВ:

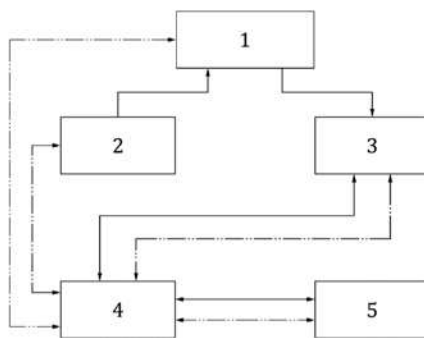
- Антенна
- Передатчик
- Приемник
- Блок обработки сигналов
- Блок управления наблюдением

6.2.2 Обработка сигналов

Сигналы, обнаруженные антенной, обрабатываются для измерения высотных профилей скорости ветра и других продуктов. Это называется обработкой сигналов, которая состоит из следующих этапов:

- 1) выполнение процессов получения комплексных (то есть синфазных (I) и сдвинутых по фазе на 90 градусов (Q) или (I/Q) принимаемых сигналов, получаемых при каждой передаче. Эти процессы включают в себя преобразование с понижением частоты, определение фазы и частотную фильтрацию;
- 2) оцифровка полученных сигналов, собранных при каждой передаче;
- 3) определение дальности. При сжатии импульсов происходит декомпрессия принимаемых сигналов I и Q, получаемых при каждой передаче. Подробная информация о сжатии импульсов приводится в разделе [6.2.4.4](#);
- 4) интегрирование полученных сигналов I и Q по времени. Это называется когерентным интегрированием. Когерентное интегрирование применяется, когда необходимо уменьшить количество данных в принимаемых сигналах;
- 5) получение высотного профиля вектора ветра с помощью методов ДКЛ или РА;
- 6) хранение продуктов измерений в устройстве хранения.

Процессы, описанные в шаге 1), выполняются в приемнике. Понижающее преобразование из РЧ в ПЧ осуществляется аналоговыми устройствами. Частотная фильтрация



Обозначения:

- | | |
|--------------|-------------------------------|
| 1 Антенна | 4 Блок обработки сигналов |
| 2 Передатчик | 5 Блок управления наблюдением |
| 3 Приемник | |

Примечания:

1. Сплошные линии обозначают передаваемые или получаемые сигналы. Пунктирными линиями показаны сигналы, необходимые для формирования передаваемых и получаемых сигналов (то есть сигналов когерентного осциллятора (КООС) и стабильного (стабилизированного) локального осциллятора (СТАЛО)) для управления передачей и приемом, а также для мониторинга рабочего состояния. Для простоты другие компоненты (например, блок питания) не показаны.
2. КООС — это источник сигнала для создания сигнала ПЧ, используемого при передаче, и для определения фазы принимаемого сигнала. СТАЛО — это источник сигнала для преобразования с повышением частоты передаваемого сигнала из ПЧ в РЧ и для преобразования принимаемого сигнала с понижением частоты из ВЧ в ПЧ. Более подробную информацию о КООС и СТАЛО см. в разделах [6.2.4.1](#) и [6.2.5.1](#). И КООС, и СТАЛО непрерывно генерируют синусоидальный сигнал.

Рисунок 5.А.7. Основные компоненты РПВ

в основной полосе (то есть частотная фильтрация сигналов I и Q) выполняется для улучшения ОСШ и удаления частотных изображений. Определение фазы для получения сигналов I и Q и частотная фильтрация принятых сигналов на ПЧ и основной полосе могут осуществляться как аналоговыми, так и цифровыми устройствами. Подробная информация о приемнике изложена в разделе 6.2.5.

Примечание: Основную полосу также называют частотой видеосигнала.

Оцифровка на этапе 2) осуществляется аналого-цифровым (А/Ц) преобразователем (АЦП), установленным в приемнике или в блоке обработки сигнала. Если после оцифровки принятых сигналов на ПЧ проводится цифровая обработка сигналов для получения сигналов I и Q (то есть определение сдвига по фазе на 90 градусов и частотная фильтрация), шаги 1) и 2) выполняются в обратном порядке. Оцифровка может существенно повлиять на чувствительность и динамический диапазон приемника. Вопросы оцифровки с помощью АЦП описаны в разделах 6.2.5.5 и 6.2.5.6.

Декомпрессия на шаге 3) и когерентное интегрирование на шаге 4) выполняются для каждого канала приемника, каждого луча антенны и каждого строка дальности. Кроме того, они выполняются с использованием полученных сигналов, собранных с каждой передачи. Таким образом, для достижения скорости обработки, достаточной для декомпрессии и когерентного интегрирования (см. 6.2.6), обычно используются программируемые пользователем вентиляльные матрицы (ППВМ) и/или цифровые процессоры сигналов (ЦПС).

Примечание: ППВМ и ЦПС подходят для выполнения цифровой обработки сигналов, которая применяется к сигналам с высокой частотой дискретизации, и могут выполняться путем сложения и умножения (например, фильтрация, свертка и суммирование).

Поскольку когерентное интегрирование уменьшает f_{Nyq} , количество когерентных интегрирований следует определять с учетом максимальной скорости ветра, которая должна измеряться без частотного искажения (см. 7.1.4). Частотное искажение, вызванное уменьшением f_{Nyq} , может привести к наложению эхосигнала в чистом воздухе и загрязнению (т.е. помехам или интерференции), даже если доплеровская частота загрязнения отличается от частоты эхосигнала в чистом воздухе. Наложение происходит, когда разность доплеровских частот между загрязнением и эхосигналом в чистом воздухе является четным числом, кратным f_{Nyq} . Заметим, что когерентное интегрирование также выполняет функцию цифрового фильтра, что приводит к некоторому ослаблению сигнала вблизи f_{Nyq} и имеет довольно своеобразную частотную характеристику^[11]. Частотная характеристика затрагивает все частоты, включая частоты за пределами f_{Nyq} .

Получение вектора ветра на шаге 5) должно выполняться для каждого строка дальности. При использовании метода ДКЛ выполняются следующие шаги^[12]:

- a) вычисление доплеровского спектра полученных сигналов для каждого строка дальности и каждого луча антенны;
- b) интегрирование доплеровских спектров. Такое интегрирование называется некогерентным. Некогерентное интегрирование осуществляется при уменьшении объема данных, хранящихся в устройстве памяти;
- c) оценка спектральных параметров (P_{echo} , V_r и ширины спектра), мощности шума (p_n и P_n) и ОСШ. Подробная информация приводится в разделе 5.1;
- d) получение вектора ветра с помощью набора радиальных доплеровских скоростей, собранных несколькими лучами антенны. Подробная информация приводится в разделе 5.3.2.

На этапе а) для вычисления доплеровского спектра обычно используется быстрое преобразование Фурье (БПФ). Фильтрация временного ряда с помощью функции окна (например, окна Хеннинга или окна Блэкмана) может применяться, когда необходимо уменьшить эффект усечения временного ряда.

На этапе б) дисперсия доплеровских спектров может быть уменьшена в $\frac{1}{\sqrt{N_{\text{incoh}}}}$ раз путем интегрирования доплеровских спектров в идеальном случае. Уменьшение дисперсии способствует улучшению обнаруживаемости эхосигнала в чистом воздухе (см. п. 7.3 и уравнение 5.A.81).

Отмечается, что некогерентное интегрирование имеет как плюсы, так и минусы. В то время как оно не способствует улучшению ОСШ эхосигнала в чистом воздухе, увеличение длины временного ряда (увеличение N_{data}) способствует улучшению ОСШ эхосигнала в чистом воздухе (см. 7.3 и уравнение 5.A.80). С другой стороны, для увеличения количества точек данных доплеровского спектра (увеличение N_{data}) необходимо увеличить объем данных, хранящихся в устройстве памяти. Некогерентное интегрирование, которое уменьшает N_{data} путем интегрирования доплеровских спектров, может уменьшить объем данных. Взаимосвязь между временем корреляции эхосигнала в чистом воздухе и улучшением ОСШ описана в п. 7.3 и уравнении 5.A.80. Заметим, что улучшение ОСШ в результате увеличения времени сбора имеет ограничения, поскольку когерентность эхосигнала в чистом воздухе уменьшается со временем.

Грубое разрешение доплеровского спектра уменьшает возможность разделения эхосигнала в чистом воздухе и других сигналов в доплеровском спектре. Оно также увеличивает искажение доплеровского спектра из-за недостаточного временного разрешения для разрешения полученных сигналов в частотной области. Это искажение особенно существенно для помех на земной поверхности, поскольку их средняя доплеровская частота равна нулю, а огибающая спектра может быть расширена^[13]. Подробную информацию о помехах на земной поверхности см. в разделе 5.2.3. Увеличенная длина временного ряда способствует уменьшению искажений доплеровского спектра. Таким образом, N_{data} и N_{incoh} должны определяться с учетом улучшения ОСШ, разрешения доплеровского спектра и объема данных, хранящихся в устройстве памяти.

На этапе с) спектральные параметры определяются путем оценки моментов нулевого, первого и второго порядка доплеровского спектра эхосигнала в чистом воздухе (см. 5.1). Моменты нулевого, первого и второго порядка можно оценить с помощью метода наименьших квадратов или метода моментов^[5,14]. В методе наименьших квадратов обычно предполагается, что эхосигнал в чистом воздухе имеет нормальное распределение. Заметим, что можно использовать и другие методы спектральной оценки.

Точность оценки p_n (и P_n) можно улучшить за счет использования доплеровских спектров в диапазонах, удаленных от РПВ, ввиду низкой чувствительности радиолокаторов в этих диапазонах. В справочной литературе [15] описывается еще один метод оценки мощности шума. При использовании этого метода точки доплеровского спектра, содержащие эхосигналы и интерференцию, удаляются при оценке p_n путем сортировки точек доплеровского спектра по интенсивности. Следует отметить, что в рамках метода, описанного в публикации [15], предполагается, что есть достаточное количество точек доплеровского спектра, в которых доминирует белый шум. Отметим, что P_n вычисляется из p_n с помощью уравнения 5.A.7.

Точность оценки спектральных параметров можно повысить, выбирая только те точки доплеровского спектра, в которых интенсивность эхосигнала в чистом воздухе значительно превышает p_n ^[16]. Точки доплеровского спектра, используемые для оценки спектральных параметров, должны быть непрерывными по доплеровской частоте.

Когда для получения вектора ветра используется эхо осадков, рассчитывается V_r эха осадков и эта величина используется для получения скорости горизонтального ветра (см. 5.2.2).

При использовании метода РА горизонтальная скорость ветра, как правило, определяется с помощью корреляций (см. 5.3.3).

Контроль качества при цифровой обработке данных может осуществляться на большинстве этапов обработки (например, при создании временных рядов, получении доплеровского спектра, оценке спектральных параметров и получении вектора ветра). Подробнее о КК в цифровой обработке данных см. в разделе 8.

6.2.3 **Антенна**

6.2.3.1 **Конфигурация**

Антенны служат для излучения радиоволн в атмосферу (передача) и обнаружения эхосигнала (прием сигнала). В зависимости от метода передачи и приема в системе РПВ, существует два вида конфигураций антенн.

- Одна и та же антенна используется как для передачи, так и для приема (моностатический радиолокатор). Для разделения передаваемого и принимаемого сигналов в этой конфигурации антенны используется коммутатор.
- Для передачи и для приема используются разные антенны.

Первая конфигурация обычно используется для тех РПВ, которые измеряют скорость ветра с помощью метода ДКЛ. Второй вариант обычно используется для РПВ, которые используют незатухающие волны с частотной модуляцией (НВЧМ) для передачи и/или метод РА.

При использовании метода ДКЛ для получения $\mathbf{V}_{\text{wind}}$ (u , v и w) необходимо использовать несколько антенных лучей. Таким образом, в методе ДКЛ антенна должна быть способна направлять свой основной луч в разных направлениях. Направлять основной луч в разные стороны механически можно с помощью одной антенны (например, одной параболической антенны), установленной на механически вращающемся постаменте, или нескольких антенн (например, нескольких параболических антенн). Антенна с фазированной решеткой, использующая несколько антенных элементов (подрешеток), электрически изменяет направление луча с помощью фазовращателей или эквивалентных средств. Антенна с одним параболическим рефлектором и несколькими фидерами позволяет направлять луч антенны в разные стороны с помощью одного антенного элемента. Диэлектрическая линза также представляет собой способ направления луча антенны в нескольких направлениях с помощью одного антенного элемента. При методе РА направление лучей передающей и приемной антенн фиксировано. Ширину луча и расположение передающей и приемной антенн следует рассчитывать с учетом требуемой точности измерения скорости ветра.

6.2.3.2 **Параметры, относящиеся к диаграмме направленности лучей антенны**

6.2.3.2.1 **Общие аспекты**

Основными параметрами антенны, которые определяют характеристики РПВ, являются коэффициент усиления антенны, ширина главного лепестка (далее — ширина луча антенны), дальность ближнего поля, точность наведения луча и боковой лепесток. На рисунке 5.А.8 показан пример диаграммы направленности лучей антенны. Диаграмма направленности лучей антенны определяется формой антенны и распределением в раскрыве (амплитудное и фазовое распределение). Для антенны с фазированной решеткой с равномерным распределением в раскрыве диаграмма направленности лучей антенны определяется диаграммой направленности антенных элементов (подрешеток) и расположением антенных элементов. Они называются множителем одиночного излучателя и множителем решетки, соответственно. Для антенны с фазированной решеткой амплитуды элементов антенны могут быть сужены, чтобы уменьшить уровень

боковых лепестков. Антенна должна быть спроектирована таким образом, чтобы не образовывался дифракционный лепесток. Заметим, что характеристики антенны РПВ определяются диаграммой направленности лучей антенны как при передаче, так и при приеме.

6.2.3.2.2 Усиление антенны

Усиление антенны определяется следующим образом:

$$G_{\text{ant}} = D_{\text{peak}} - RL - 10\log_{10}(\eta_{\text{rad}}) \quad (5.A.33)$$

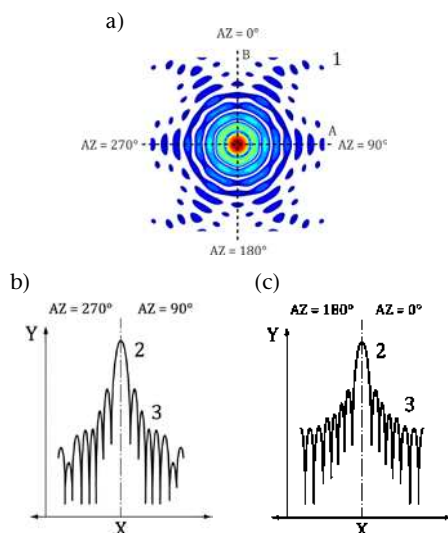
где:

G_{ant} — усиление антенны в децибелах;

D_{peak} — направленность в максимуме главного лепестка в децибелах;

η_{rad} — эффективность излучения антенны;

RL — обратные потери антенны в децибелах.



Обозначения:

- | | | | |
|---|---|---|---------------|
| 1 | Диаграмма направленности лучей антенны в направлениях по азимуту и возвышению | X | Зенитный угол |
| 2 | Главный лепесток | Y | Усиление |
| 3 | Боковые лепестки | | |

Примечания:

- На рисунке а) показаны диаграммы направленности лучей антенны в азимутальном и зенитном углах. Направление луча антенны – вертикальное. AZ обозначает азимутальный угол, а расстояние от центра луча, которое является точкой пересечения двух пунктирных линий, — зенитный угол.
- На рисунке б) показана диаграмма направленности лучей антенны в сечении, обозначенном А на рисунке а).
- На рисунке с) показана диаграмма направленности лучей в сечении, обозначенном В на рисунке а).
- Некоторые боковые лепестки, показанные на рисунках б) и с), не показаны на рисунке а) из-за их низкого уровня.

Рисунок 5.A.8. Пример диаграммы направленности лучей антенны

Подробная информация об ОП изложена в разделе 6.2.3.3. η_{rad} определяется следующим образом:

$$\eta_{\text{rad}} = \eta_c \eta_d \quad (5.A.34)$$

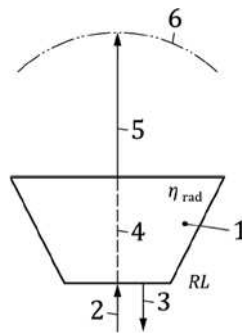
где:

η_c — коэффициент омической проводимости антенны;

η_d — диэлектрическая эффективность антенны.

Рисунок 5.A.9 иллюстрирует определение усиления антенны. Рассогласование полных сопротивлений антенны и кабеля создает ОП (см. метки 2 и 3). Омические потери проводимости и диэлектрические потери антенны дают η_{rad} (см. метку 4).

Отметим, что усиление антенны необходимо вычислять с использованием направленности антенны, эффективности излучения и ОП. Увеличение усиления антенны обычно приводит к повышению чувствительности радиолокатора. На чувствительность радиолокатора влияет усиление антенны как при передаче, так и при приеме (см. 7.3).



Обозначения:

- 1 Антенна
- 2 Электромагнитная волна, поступающая к антенне
- 3 Электромагнитная волна, отраженная в точке входа антенны
- 4 Электромагнитная волна, передаваемая в антенне
- 5 Радиоволна, излучаемая антенной в направлении с максимумом направленности
- 6 Главный лепесток антенны

Примечания:

1. Определение η_{rad} и RL см. в тексте.
2. На рисунке показан поток сигналов при передаче. При приеме поток сигнала меняется на противоположный, и значения направленности, эффективности и RL при передаче совпадают со значениями при приеме.

Рисунок 5.A.9. Определение усиления антенны

6.2.3.2.3 Ширина луча антенны

Рисунок 5.A.10 иллюстрирует определение ширины луча антенны. Ширина луча антенны определяется точками, в которых направленность антенны уменьшается на 3 дБ по сравнению с максимумом главного лепестка. Точка с максимальным усилением главного лепестка находится между этими двумя точками. Ширина луча антенны РПВ определяется суммарной диаграммой направленности приёмной и передающей антенны. Ширина суммарной диаграммы направленности приёмной и передающей антенны определяет угловое разрешение РПВ.

Спектральная ширина эхосигнала в чистом воздухе увеличивается за счет горизонтального расширения главного лепестка, и это расширение называется расширением луча (справочная литература [4] и 7.3.2 в справочной литературе [1]). Расширение луча уменьшается с уменьшением ширины главного лепестка (ширины луча антенны), а уменьшение эффекта расширения луча способствует повышению точности оценки интенсивности турбулентности по ширине спектра.

6.2.3.2.4 Ближнее поле

Ближнее поле — это область, в которой диаграмма направленности антенны зависит от расстояния до нее. Граница между ближним и дальним полем определяется следующим образом:

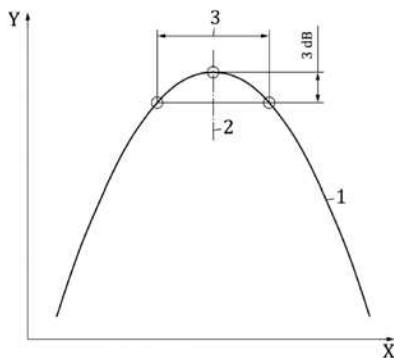
$$R_{\text{thr_ant}} = \frac{2D_{\text{max}}^2}{\lambda} \quad (5.A.35)$$

где:

$R_{\text{thr_ant}}$ — это диапазон границы между ближним и дальним полем;

D_{max} — максимальный диаметр антенны.

Максимальная дальность ближнего поля увеличивается с ростом усиления антенны (то есть, увеличивается при уменьшении ширины луча антенны). При диапазонах в ближнем поле точность продуктов измерения может снижаться, поскольку диаграмма направленности антенны формируется не так хорошо, как в дальнем поле. Подробная информация об определении дальности изложена в разделе 7.2.



Обозначения:

- | | | | |
|---|--------------------------|---|----------|
| 1 | Главный лепесток антенны | X | Угол |
| 2 | Центр главного лепестка | Y | Усиление |
| 3 | Ширина луча антенны | | |

Рисунок 5.A.10. Определение ширины луча антенны

6.2.3.2.5 *Направление луча*

Количество антенных лучей и их направления должны определяться с учетом метода оценки скорости ветра (см. 5.3) и точности оценки вектора ветра. На точность оценки вектора ветра особенно влияет зенитный угол луча антенны. Зенитный угол воздействует на доплеровскую скорость следующим образом:

- больший зенитный угол увеличивает величину горизонтальной скорости ветра, проецируемой на доплеровскую скорость эхосигнала в чистом воздухе. Он также уменьшает величину вертикальной скорости ветра, проецируемой на доплеровскую скорость. Таким образом, больший зенитный угол может способствовать повышению точности измерения горизонтальной скорости ветра при слабом ветре и уменьшению загрязнения из-за помех на земной поверхности в эхосигнале в чистом воздухе;

Примечание: $V_{\text{н}}$, показанная на рисунке 5.А.2, выражается как $V_{\text{н}} = u \sin \phi_1 \sin \theta_1 + v \cos \phi_1 \sin \theta_1 + w \cos \theta_1$.

- увеличение зенитного угла уменьшает максимальную скорость ветра, которую можно безопасно измерить без частотного искажения (см. уравнение 5.А.75). Это также увеличивает неоднородность поля ветра в том объеме, куда направляются лучи антенны;
- больший зенитный угол может значительно увеличивать загрязнение из-за помех, присутствующих на земной поверхности или рядом с ней, за счет увеличения боковых лепестков антенны при малых углах возвышения.

С учетом вышеупомянутых факторов часто используются зенитные углы в диапазоне от 10° до 15°.

При изменении направления луча антенны с каждым импульсом f_{Nyq} будет меньше, чем при изменении направления луча антенны после сбора доплеровского спектра или после сбора всех доплеровских спектров, используемых при некогерентном интегрировании (см. уравнения 5.А.69 и 5.А.71). В разделе 7.1.4 описываются подробности вычисления f_{Nyq} . Как правило, РПВ, работающие в ОВЧ-диапазоне (например, 50 МГц), меняют направление луча с каждым импульсом, поскольку большая длина волны их радиолокатора помогает компенсировать снижение f_{Nyq} . При изменении направления луча антенны с каждым импульсом уменьшается разница во времени сбора данных между лучами антенны по сравнению со случаями, когда направление луча изменяется после сбора доплеровского спектра или после сбора всех доплеровских спектров, используемых в некогерентном интегрировании. Из-за разницы во времени сбора данных между лучами антенн может снижаться точность оценки вектора ветра.

6.2.3.2.6 *Точность наведения луча*

Точность наведения луча должна соответствовать требованиям, предъявляемым к измерениям скорости ветра и турбулентности. Помимо конструкции и изготовления антенны точность наведения луча зависит и от установки антенны. Точность установки антенны следует рассмотреть при проектировании, производстве и установке РПВ. Для антенны с фазированной решеткой еще одним фактором, определяющим точность наведения луча, является управление фазой антенных элементов (подрешеток). Подробная информация о точности измерения изложена в разделе 7.4.

6.2.3.2.7 *Боковые лепестки*

Форма и уровни боковых лепестков являются важнейшими факторами, определяющими загрязнение принимаемых сигналов помехами и интерференцией. Увеличение размера антенны обычно приводит к уменьшению боковых лепестков при малых углах возвышения.

6.2.3.3 Коэффициент стоячей волны по напряжению и обратные потери антенны

Коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВН) — это измерение отражения сигнала передачи обратно к передатчику и приемнику. Обратные потери антенны (ОП) — это потери при передаче сигнала, вызванные отражением в точке соединения. КСВН и ОП определяются следующим образом:

$$VSWR = \frac{1 + |\rho|}{1 - |\rho|} \quad (5.A.36)$$

и

$$RL = -20 \log_{10}(\rho) \quad (5.A.37)$$

где ρ — коэффициент отражения в точке соединения. ОП определяется в децибелах.

Значение ОП может быть рассчитано на основе значения КСВН, и наоборот. Антенна должна быть спроектирована и сконструирована таким образом, чтобы отражение от нее не повредило передатчик или приемник.

6.2.3.4 Обтекатель антенны радиолокатора и экранирующее ограждение

В местах, где скопление снега может повредить антенну РПВ, может быть установлен обтекатель антенны радиолокатора. Обтекатель может приводить к потере мощности при передаче и приеме, ухудшению точности наведения луча антенны и увеличению уровня боковых лепестков.

Экранирующее ограждение — это способ уменьшения помех. Такое ограждение также полезно для снижения возможных помех для других радиостанций за счет уменьшения излучения радиоволн при малых углах возвышения. Подробная информация о помехах и интерференции приводится в разделах 5.2.3 и 5.2.4, соответственно. Конструкция экранирующего ограждения описывается в разделе 10.5.

6.2.4 Передатчик

6.2.4.1 Функции

Передатчик используется для формирования радиочастотных сигналов для передачи. Антенна излучает радиочастотные сигналы передачи. Основные компоненты передатчика показаны на рисунке 5.A.11. Обычно передатчик выполняет следующие функции: генерация источника сигнала КООС и модулятором, преобразование с повышением частоты смесителем, усиление сигнала усилителем и частотная фильтрация частотным фильтром. Как правило, сигнал передачи формируется на ПЧ, а затем преобразуется с повышением частоты в РЧ. Сигнал передачи обычно усиливается полупроводниковыми усилителями. В большинстве случаев усиление проводится в несколько этапов. Частотная фильтрация осуществляется путем устранения побочных излучений радиоволн. Заметим, что необходимо обеспечивать достаточное охлаждение передатчика, чтобы предотвратить его повреждение из-за перегрева. Обратите внимание, что аналоговая обработка сигнала КООС и модулятором (то есть формирование сигнала передачи на ПЧ) часто заменяется генератором цифровой формы волны, цифро-аналоговым (Ц/А) преобразователем и фильтром пропускания низких частот. Фильтр пропускания низких частот используется для удаления ненужных частотных составляющих.

Фундаментальными параметрами, определяющими производительность передатчика, является максимальная выходная мощность, длительность передачи, ширина передаваемого импульса (τ_p), максимальный коэффициент заполнения, занимаемая полоса пропускания, побочное излучение и время восстановления от передачи до приема.

6.2.4.2 Максимальная выходная мощность

Выходная мощность передатчика является одним из основных факторов, определяющих чувствительность радиолокатора (см. уравнение 5.А.76 и раздел 7.3). Пиковая выходная мощность передатчика (P_p) должна определяться и измеряться на конечном выходе передатчика.

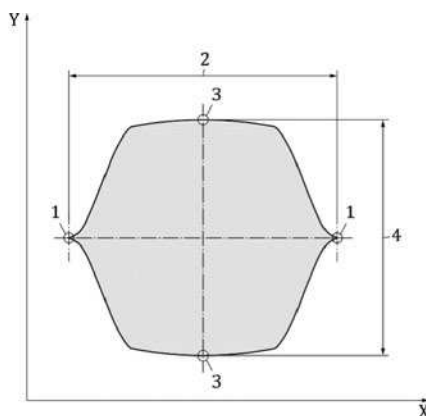
Рисунок 5.А.12 представляет собой схематическую иллюстрацию, поясняющую передаваемый импульс. На рисунке 5.А.12 определен размах напряжения передаваемого импульса (V_{pp}). При измерении можно определить фронты передаваемого импульса,



Примечания:

1. Рисунок упрощен для того, чтобы выделить передатчик, показав только его основные компоненты.
2. Передатчик может иметь различную конфигурацию в зависимости от конструкции РПВ.

Рисунок 5.А.11. Основные компоненты передатчика



Обозначения:

- | | |
|---|--------------|
| 1 Фронты передаваемого импульса. | X Время |
| 2 τ_d | Y Напряжение |
| 3 Пик огибающей передаваемого импульса | |
| 4 Размах напряжения передаваемого импульса (V_{pp}) | |

Примечания:

1. Определение τ_d см. в разделе 6.2.4.3.
2. Затененная область показывает передаваемый импульс. Огибающая передаваемого импульса показана толстой сплошной кривой.

Рисунок 5.А.12. Схематическая иллюстрация, поясняющая передаваемый импульс

когда напряжение передаваемого импульса сравнимо с уровнем шума испытательного оборудования (например, осциллографа) или меньше его. V_{pp} определяется пиковым напряжением вокруг центра импульса. P_p также можно измерить с помощью измерителя пиковой мощности (см. таблицу 5.A.5 в разделе 11.3). Заметим, что потери между точкой выхода передатчика и антенной уменьшают излучаемую антенной мощность. Потери между точкой выхода передатчика и антенной следует учитывать при расчете чувствительности радиолокатора, описанном в разделе 7.3.

6.2.4.3 Ширина импульса, коэффициент заполнения, занимаемая полоса пропускания, побочное излучение и время восстановления

τ_p — один из важнейших факторов, определяющих разрешение по дальности (высоте) и чувствительность радиолокатора. τ_p должно соответствовать одному из двух следующих определений:

- период времени, в течение которого генерируется сигнал передачи (τ_d);
- длительность временного интервала между двумя точками снижения на 3 дБ от пиковой точки (τ_{3dB}).

При сжатии импульсов с фазовой модуляцией τ_p определяется по субимпульсу. Определение τ_p должно устанавливаться в ходе обсуждения между пользователем и поставщиком. На рисунке 5.A.12 проиллюстрировано определение τ_d . В импульсных радарах форма волны передаваемого импульса, как правило, не является прямоугольной и формируется с помощью фильтра низких частот и/или полосового фильтра, чтобы отвечать лицензионным требованиям к занимаемой полосе частот и побочному излучению для радиостанции. Таким образом, когда τ_p определяется через τ_d , при оценке чувствительности радиолокатора необходимо учитывать коэффициент потерь, вызванный формированием сигнала передаваемого импульса (L_p) (см. 7.3). На рисунке 5.A.13 представлена схематическая иллюстрация, поясняющая L_p . L_p определяется отношением передаваемой мощности импульса волнообразной формы к прямоугольному импульсу и определяется следующим образом:

$$L_p = \frac{A}{A + B + C} \quad (5.A.38)$$

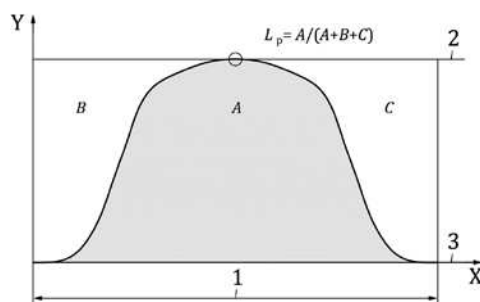
где A , B и C — области, указанные на рисунке 5.A.13.

На рисунке 5.A.14 показано определение τ_{3dB} . τ_{3dB} можно измерить с помощью следующих шагов:

- 1) найдите локальную пиковую мощность (P_1);
- 2) найдите моменты времени, когда мощность составляет 10% от P_1 (10% моменты);
- 3) найдите точку мощности посередине между двумя 10% моментами и обозначьте ее как P_p ;
- 4) найдите моменты, в которых мощность составляет 50% от P_p (50% моменты).

Разница во времени между двумя 50% моментами составляет τ_{3dB} .

Коэффициент заполнения (или рабочий цикл) определяется соотношением длительностей передачи данных в пределах ИМИ. Средняя выходная мощность зависит от общей выходной мощности передатчика и коэффициента заполнения. Полную выходную мощность передатчика можно рассчитать путем интегрирования мгновенной выходной мощности передатчика по времени или с помощью P_p , L_p и длительности передачи. Отметим, что при вычислении средней и полной выходной мощности антенны необходимо учитывать потери между точкой выхода передатчика и антенной. Сжатие



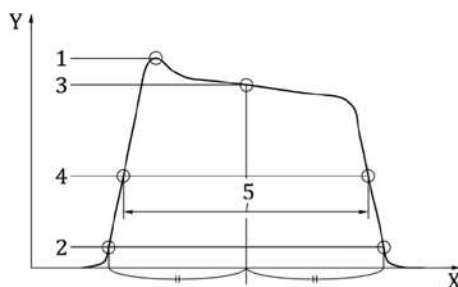
Обозначения:

- | | | | |
|---|--------------------------------------|-----|----------|
| 1 | τ_d | X | Время |
| 2 | Пик огибающей передаваемого импульса | Y | Мощность |
| 3 | 0 уровень мощности | | |

Примечания:

1. Определение τ_d и L_p см. в тексте.
2. В заштрихованной области A показан передаваемый импульс с формированием волны. Затененные области B и C показывают разницу в мощности между переданным и прямоугольным импульсом.

Рисунок 5.А.13. Схематическая иллюстрация, поясняющая L_p



Обозначения:

- | | | | |
|---|-----------------------|-----|----------|
| 1 | P_1 | X | Время |
| 2 | 10% мощности от P_1 | Y | Мощность |
| 3 | P_p | | |
| 4 | 50% мощности от P_p | | |
| 5 | τ_{3dB} | | |

Примечания:

1. Определение P_1 , P_p и τ_{3dB} см. в тексте.
2. Форма импульса показана для пояснения. В действительности меньшая разница между P_1 и P_p и более сглаженная огибающая между нарастающим и спадающим фронтом позволяет лучше взвесить принимаемые сигналы по дальности (см. 6.3.1.5, 7.1.1 и 7.2).

Рисунок 5.А.14. Определение τ_{3dB}

импульсов используется, когда длительность передачи не удовлетворяет требованиям к разрешению по дальности. Подробная информация о сжатии импульсов и разрешении по дальности приводится в разделах 6.2.4.4 и 7.1.1, соответственно.

Необходимо исследовать загрязнение, вызванное мешающими сигналами на линии передачи, поскольку оно может быть источником побочного излучения. Источниками загрязнения могут служить утечки из тактовых сигналов, сигналов синхронизации, сигналов от КООС и СТАЛО и других. Загрязнение, вызванное мешающими сигналами на линии передачи, может увеличивать потери при передаче сигнала, если частотный фильтр для удаления загрязнений установлен после окончательного усилителя.

Генерация и формирование сигнала передачи на ПЧ часто осуществляются в цифровом устройстве. Сигнал передачи, сформированный в цифровом виде на ПЧ, необходимо отфильтровать с пропуском низких частот после Ц/А преобразования, чтобы удалить ненужные частотные компоненты.

Для РПВ, использующих импульсы передачи, необходимо учитывать время нарастания передаваемого импульса и время восстановления от передачи до приема. Время нарастания может влиять на формирование сигнала, а время восстановления является одним из факторов, влияющих на минимальный измеряемый диапазон. Увеличение мощности шума во время восстановления может снижать качество продуктов измерений, получаемых с помощью РПВ.

Для РПВ с передачей импульсов формирование сигнала и частотный фильтр, установленный после окончательного усилителя, приводят к потере мощности радиоволн, излучаемых антенной. Их необходимо учитывать при расчете чувствительности радиолокатора, описанной в разделе 7.3.

6.2.4.4 Сжатие импульсов

Для улучшения разрешения по дальности и ОСШ сигналы передачи часто модулируются по фазе или частоте. Модуляция называется сжатием импульсов. При сжатии импульсов с фазовой модуляцией передаваемый импульс кодируется путем его разделения на субимпульсы. Обычно используется двоичное фазовое кодирование. При цифровой обработке данных в реальном времени полученные сигналы декодируются. После декодирования разрешающая способность по дальности определяется субимпульсом (см. 6.2.4.3 и 7.1.1). ОСШ после декодирования в N_{subp} раз больше, чем без сжатия импульсов при идеальных условиях.

Код Баркера^[17] состоит из одного кода с фазовой модуляцией во времени. При использовании кода Баркера появляются боковые лепестки по дальности. Комплементарный код^[18] использует пару последовательностей во времени, а значит, способен уменьшить боковые лепестки по дальности. Для кодов Баркера и комплементарных кодов не следует использовать принятые сигналы, собранные на первых $N_{\text{subp}} - 1$ строках дальности (далее именуемые усеченным диапазоном), поскольку их нельзя полностью декодировать. Двоичная кодовая последовательность, разработанная Спано и Гебребраном^[19] (далее — код Спано и Гебребрана), позволяет осуществлять декодирование в усеченном диапазоне. Число временных последовательностей кода Спано и Гебребрана составляет $2 N_{\text{subp}}$. Код Спано и Гебребрана также можно использовать для увеличения максимальной измеряемой высоты.

Для сжатия импульсов с частотной модуляцией обычно используется НВЧМ. Демодуляция может осуществляться путем преобразования полученного сигнала из области времени в область частоты, поскольку частотный сдвиг в полученном сигнале соответствует диапазону от РПВ. Основными параметрами, определяющими улучшение ОСШ, являются продолжительность передачи и частотный диапазон. Частотный диапазон — основной параметр, определяющий разрешающую способность по дальности.

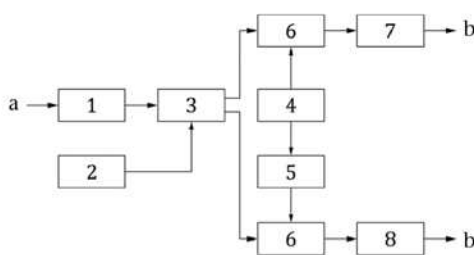
6.2.5 Приемник

6.2.5.1 Функции

Приемник используется для формирования комплексных (I и Q) получаемых сигналов, распознаваемых антенной. В общем случае приемник собирает сигналы, обнаруживаемые антенной, понижает частоту полученных сигналов до ПЧ, формирует I и Q полученных сигналов на основной полосе (видео частоте) с помощью определения фазы и выполняет частотную фильтрацию для повышения ОСШ и удаления частотных изображений. В этом приложении конечный продукт приемника определяется как сигналы I и Q после частотной фильтрации на конечном этапе. В зависимости от конфигурации приемника на выходе получается цифровой или аналоговый сигнал.

На рисунке 5.A.15 показаны основные компоненты приемника. Как правило, сначала сигнал, принятый антенной, усиливается с помощью усилителя с низким уровнем собственных шумов (МШУ). Затем смеситель преобразует частоту полученного сигнала с понижением из РЧ в ПЧ. При преобразовании частоты частотные изображения необходимо удалять с помощью частотной фильтрации, чтобы не допустить загрязнения от ненужных частот. После преобразования частоты в ПЧ фаза принимаемого сигнала определяется фазочувствительным детектором (определение фазы) для формирования сигналов I и Q основной полосы. Затем сигналы I и Q фильтруются для повышения ОСШ и удаления частотных изображений. Подробнее о частотной фильтрации сигналов I и Q (на основной полосе) см. в разделе 6.2.5.3.

Фундаментальными параметрами, определяющими производительность приемника, являются суммарный КШ (F_{total}), динамический диапазон, линейность и усиление приемника. Передатчик и приемник должны быть сконструированы таким образом, чтобы передача сигнала не повредила приемник. Отметим, что определение фазы и частотная фильтрация полученных сигналов на ПЧ и основной полосе могут осуществляться как аналоговыми устройствами (фазочувствительный детектор и частотные фильтры), так и с помощью цифровой обработки данных.



Обозначения:

1	МШУ	6	Фазочувствительный детектор
2	СТАЛО	7	Частотный фильтр для сигналов I
3	Смеситель и частотный фильтр	8	Частотный фильтр для сигналов Q
4	КООС	a	От антенны
5	$\pi/2$ фазовращатель	b	К блоку обработки сигналов

Примечания:

1. Рисунок упрощен для того, чтобы выделить приемник, показав только его основные компоненты.
2. Приемник может иметь различную конфигурацию в зависимости от конструкции РПВ.

Рисунок 5.A.15. Основные компоненты приемника

6.2.5.2 Цифровая обработка данных в приемнике

Определение фазы и частотная фильтрация принятых сигналов на ПЧ и основной полосе могут осуществляться как аналоговыми устройствами, так и с помощью цифровой обработки данных. При цифровом определении фазы и частотной фильтрации получаемые сигналы на ПЧ оцифровываются АЦП, а затем оцифрованные сигналы обрабатываются в режиме реального времени. Поскольку цифровое определение фазы и частотная фильтрация выполняются с использованием полученных сигналов с высокой частотой дискретизации, а также поскольку эту обработку необходимо выполнять в режиме реального времени, для этого обычно используются ППВМ и/или ЦПС. Цифровая обработка данных для получения сигналов I и Q (определение фазы и частотная фильтрация) и цифровая обработка данных, описанная в п. 6.2.6, могут выполняться в одном и том же устройстве обработки сигналов.

При использовании аналогового фазового детектора и частотной фильтрации для получения сигналов I и Q частота получаемых сигналов преобразуется с понижением на основную полосу аналоговыми устройствами. Сигналы I и Q основной полосы, обрабатываемые аналоговыми устройствами, оцифровываются с помощью двух АЦП (см. рис. 5.А.15 и 6.2.6). Обратите внимание, что даже при аналоговом определении фазы и частотной фильтрации часть цифровой обработки данных в блоке обработки сигналов выполняется с помощью ППВМ и/или ЦПС (см. 6.2.6).

Определение фазы и частотная фильтрация на основе цифровой обработки сигнала имеет следующие преимущества по сравнению с аналоговыми устройствами:

- ортогональность сигналов I и Q значительно выше, чем при использовании аналогового определения фаз (дисбаланс между сигналами I и Q значительно меньше, чем при аналоговом определении фаз);
- внешние шумы от тактовых сигналов, сигналов управления и других сигналов не загрязняют сигналы I и Q, если их частота достаточно ниже ПЧ;
- частотный фильтр имеет гибкую форму, поскольку настраивается в цифровом виде.

Преимущество аналогового определения фаз и частотной фильтрации заключается в следующем:

- представленные в продаже АЦП имеют лучшее разрешение и лучший динамический диапазон по сравнению с использованием цифрового определения фаз и частотной фильтрации. Это обеспечивает более высокое качество измерений в условиях сильного загрязнения окружающей среды (например, прерывистыми помехами или помехами на земной поверхности).

При цифровом определении фазы и частотной фильтрации необходимо учитывать следующее:

- 1) для устранения частотного искажения получаемые сигналы перед подачей на АЦП необходимо пропустить через полосовой или низкочастотный фильтр;
- 2) диапазон входных частот АЦП должен включать частоту полученных сигналов, подвергаемых дискретизации АЦП (то есть ПЧ). Это необходимо делать даже при использовании понижающей дискретизации (когда частота дискретизации АЦП меньше частоты полученных сигналов);
- 3) АЦП должен иметь достаточный динамический диапазон для аналоговой части приемника (см. 6.2.5.5 и 6.2.5.6);
- 4) использование в вычислениях целочисленных типов данных и/или данных с фиксированной точкой может снижать точность и динамический диапазон принимаемых сигналов, поскольку они имеют значительные ограничения

по диапазону представляемых значений. Необходимо тщательно продумать и исследовать такой диапазон представляемых значений на каждом этапе цифровой обработки сигналов, чтобы минимизировать понижение точности и динамического диапазона принимаемых сигналов;

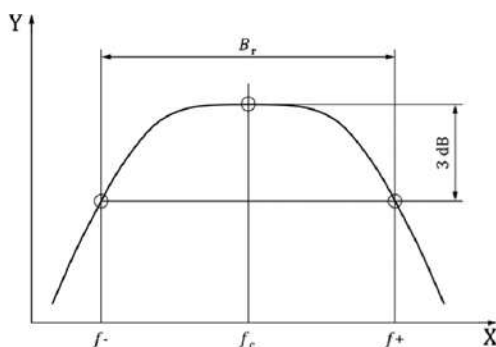
- 5) следует изучить неустойчивость частоты тактовых сигналов, поскольку она может увеличивать неоднозначность цифрового определения фазы.

6.2.5.3 Полоса пропускания частот

Полоса пропускания частот приемника (B_r) определяется частотным фильтром для сигналов I и Q (см. 6.2.5.1). B_r определяется полной шириной полумощности. Рисунок 5.A.16 иллюстрирует определение B_r . f_+ и f_- представляют собой частоты, на которых усиление снижается на 3 дБ по сравнению с усилением на центральной частоте f_c . B_r вычисляется на основе f_+ и f_- следующим образом:

$$B_r = f_+ - f_- \quad (5.A.39)$$

Основным фактором, определяющим B_r , служит форма передаваемого импульса. Подробная информация о передаваемом импульсе изложена в разделах 6.2.4.2, 6.2.4.3 и 6.2.4.4. Когда частотная фильтрация сигналов I и Q осуществляется в цифровой части приемника, в общем случае B_r определяется на основе цифровой обработки сигнала. При проектировании фильтра следует учитывать частотные характеристики как в полосе пропускания, так и в полосе загира. Вместо B_r , определенного в соответствии с уравнением 5.A.39, можно подставить B_r , условно определенную пользователем.



Обозначения:

X Частота

Y Усиление

Примечание:

Определение f_c , f_- , f_+ и B_r см. в тексте.

Рисунок 5.A.16. Определение полосы пропускания приемника

6.2.5.4 Шум

6.2.5.4.1 Коэффициент шума

Шум приемника, который создается в приемнике, обычно можно считать белым шумом. F_{total} и общее усиление приемника определяются между входом МШУ и точкой входа АЦП. F_{total} определяется усилением и коэффициентами шума (КШ) компонентов приемника. Когда в приемнике соединены n компонентов, F_{total} обозначается как:

$$F_{\text{total}} = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} + \frac{F_3 - 1}{G_1 G_2} + \dots + \frac{F_n - 1}{G_1 G_2 \dots G_{n-1}} \quad (5.A.40)$$

где:

F_i - коэффициент шума i -го усилителя;
 G_i - усиление i -го усилителя.

Обратите внимание, что в уравнении 5.A.40 (F_{total}) необходимо учитывать все компоненты, которые усиливают или ослабляют принимаемый сигнал. Поскольку F_1 и G_1 — это КШ и усиление МШУ, соответственно, они являются наиболее важными факторами, определяющими F_{total} . Усиление и КШ компонентов приемника должны быть рассчитаны таким образом, чтобы увеличение F_{total} компонентами приемника, помимо МШУ, было достаточно малым.

На рисунке 5.A.17 показан пример изменений КШ в аналоговой части приемника. S_{min} — минимальная входная мощность приемника. S_{min} в точке входа МШУ (то есть в точке входа приемника) обычно определяется мощностью шума, параметрами которой являются полоса пропускания частот приемника и шумовая температура в точке входа МШУ (шумовая температура на выходе линии передачи). Более подробную информацию о полосе пропускания приемника и шумовой температуре на выходе линии передачи (шумовой температуре в точке входа МШУ) см. в разделе 6.2.5.3 и на рисунке 5.A.18 соответственно. S_{min} в точке входа АЦП обычно определяется мощностью шума приемника (см. 6.2.5.4.3) и коэффициентом усиления приемника. Усиление приемника должно быть рассчитано таким образом, чтобы усечение шума, вызванное квантованием принимаемого сигнала, не оказывало существенного влияния на оценку мощности шума. Отметим, что АЦП оцифровывает (квантует) полученный сигнал. S_{min} является одним из важнейших факторов, определяющих динамический диапазон и линейность. Подробная информация о динамическом диапазоне и линейности изложена в разделе 6.2.5.5.

S_{max} — максимальная входная мощность, при которой не происходит насыщение мощности. Поскольку S_{max} в точке входа АЦП определяет максимальную мощность, подаваемую на АЦП, S_{max} следует определять с учетом максимальной входной мощности АЦП. При расчете S_{max} необходимо учитывать уровень насыщения каждого компонента приемника. S_{max} является одним из важнейших факторов, определяющих динамический диапазон и линейность, а увеличение S_{max} улучшает эти параметры. Подробная информация о динамическом диапазоне и линейности изложена в разделе 6.2.5.5.

На рисунке 5.A.17 графики S_{min} и S_{max} начинаются от точки входа МШУ. Динамический диапазон в аналоговой части приемника определяется разницей между S_{min} и S_{max} . Приемник должен быть спроектирован с учетом динамического диапазона. Большой динамический диапазон обеспечивает увеличение дальности обнаружения эхосигналов.

КШ также является одним из факторов, которые следует учитывать при проектировании приемника. F_{total} — это КШ в точке входа АЦП. F_{total} является важнейшим фактором, от которого зависит предел обнаружения принимаемых сигналов, определяемых аналоговыми компонентами приемника. При меньшем F_{total} повышается чувствительность радиолокатора, поскольку меньший F_{total} снижает мощность шума приемника (см. 6.2.5.4.2 и 6.2.5.4.3).

Отметим, что на рисунке 5.A.17 описывается изменение уровня сигнала только в аналоговой части приемника. Поскольку динамический диапазон определяется

на конечном выходе сигналов I и Q (сигналы I и Q после частотной фильтрации на конечном этапе), при проектировании РПВ необходимо учитывать динамический диапазон как в аналоговой, так и в цифровой части приемника.

Также следует отметить, что потери между антенной и МШУ ухудшают предел обнаружения РПВ (см. 6.2.5.4.2). Потери между антенной и МШУ следует учитывать при расчете чувствительности радиолокатора (см. 7.3 и уравнение 5.A.78).

6.2.5.4.2 Шумовая температура

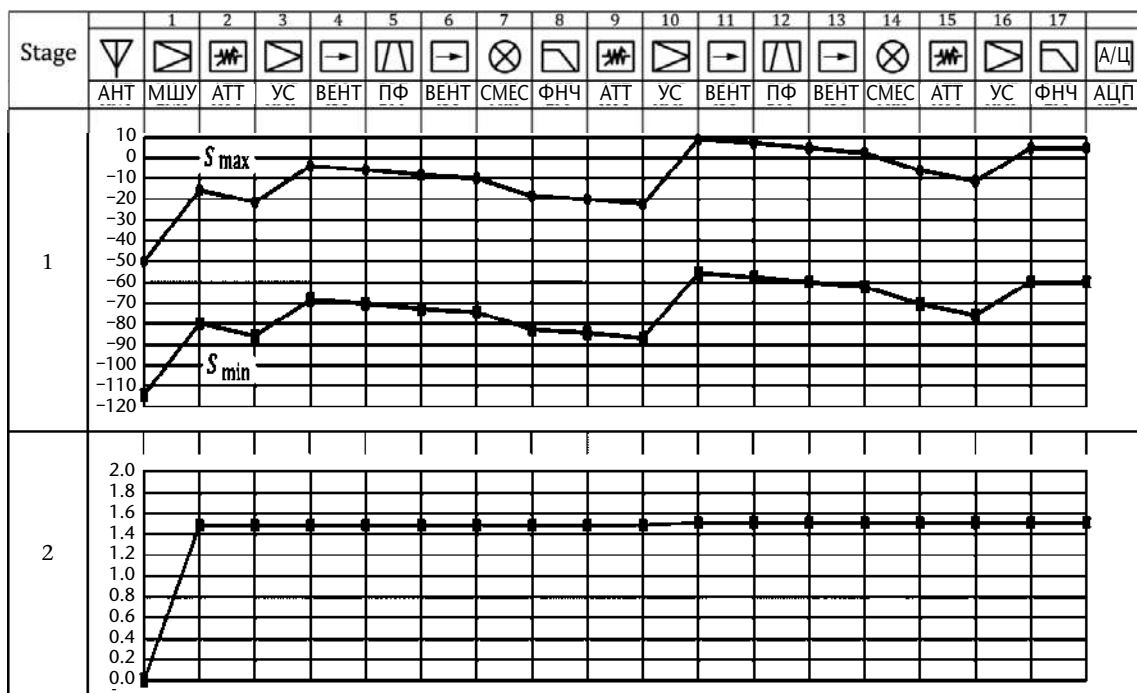
На рисунке 5.A.18 показана схематическая иллюстрация, поясняющая шумовую температуру приемника. Шумовая температура системы приемника T_n определяется следующим образом:

$$T_n = \frac{1}{I_a I_f} (T_s - T_0) + T_0 + T_r \quad (5.A.41)$$

где:

I_a — коэффициент потерь антенны;

I_f — коэффициент потерь в линии передачи между антенной и точкой входа приемника;



Обозначения:

1 Изменения S_{min} и S_{max} в дБм
2 Изменения КШ в дБ
АНТ Антенна
МШУ Малошумящий усилитель
АТТ Аттенюатор

УС Усилитель
БЕНТ Вентиль
ПФ Полосовой фильтр
СМЕС Смеситель
ФНЧ Фильтр пропускания низких частот

Рисунок 5.A.17. Пример изменения динамического диапазона и КШ в аналоговой части приемника

T_s — эффективная температура шума неба;

T_0 — температура окружающей среды;

T_r — эквивалентная температура входного шума приемника.

Коэффициент потерь l определяется как $l \equiv \frac{P_{in}}{P_{out}}$, где P_{in} и P_{out} — входная и выходная

мощность схемы, соответственно. l_a определяется как отношение входной мощности к выходной мощности антенны. l_f определяется как отношение входной мощности к выходной мощности линии передачи.

T_s определяется либо путем измерения, либо путем соответствующих вычислений. При расчете T_s следует использовать следующее уравнение:

$$T_s = T'_s \left(1 - \frac{T_{ag}}{T_g} \right) + T_{ag} \quad (5.A.42)$$

где:

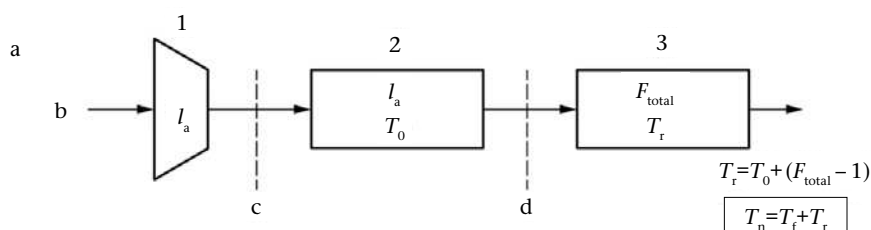
T'_s — температура шума неба, обусловленного космическим и атмосферным излучением, для идеальной антенны (без потерь, без боковых лепестков, направленных на Землю), расположенной на поверхности Земли;

T_g — эффективная шумовая температура грунта;

T_{ag} — вклад шумовой температуры грунта в температуру антенны.

Отметим, что T'_s зависит от частоты и угла возвышения луча антенны. Уравнение 5.A.42

основано на уравнении 5.28 из справочной литературы [1]. Для большей точности при расчете T_s можно учесть диаграмму направленности лучей антенны. Обычно используются значение T_0 , равное 290 К, T_g — 290 К и T_{ag} — 36 К (см. справочную литературу [1] (стр. 113) и [20]).



Обозначения:

- | | |
|------------------|---|
| 1 Антенна | a Температура окружающего воздуха (T_0) |
| 2 Линия передачи | b Эффективная температура шума неба (T_s) |
| 3 Приемник | c Шумовая температура на выходе антенны ($T_a = T_s/l_a + T_0(1-1/l_a)$) |
| | d Шумовая температура на выходе линии передачи ($T_i = T_a/l_f + T_0(1-1/l_f)$) |

Примечание:

Определение l_a , l_f и F_{total} см. в тексте. Подробная информация о T_s , T_r и T_n изложена в тексте.

Рисунок 5.A.18. Схема, поясняющая шумовую температуру приемника

T_r задается уравнением:

$$T_r = T_0(F_{\text{total}} - 1) \quad (5.A.43)$$

где F_{total} — общий КШ приемника, определенный в уравнении 5.A.40.

6.2.5.4.3 Мощность шума

Мощность шума приемника P_N выражается следующим образом:

$$P_N = kT_n B_r \quad (5.A.44)$$

где:

k — постоянная Больцмана ($= 1,38 \cdot 10^{-23}$ ДжК⁻¹);

T_n — шумовая температура приемника, определенная в уравнении 5.A.41;

B_r — полоса пропускания приемника, определенная в п. 6.2.5.3.

P_N определяется в точке входа приемника. Отметим, что при вычислении P_N необходимо исключить вклад сжатия импульсов, цифровой фильтрации полученного сигнала, интегрирования принятых сигналов по времени и некогерентного интегрирования. Шумовую составляющую полученного сигнала теоретически можно описать как гауссовский случайный сигнал, который независим (то есть дельта-коррелирован) во времени и, следовательно, не имеет зависимости от частоты (имеет белый спектр мощности (белый шум)).

6.2.5.5 Динамический диапазон и линейность

Динамический диапазон определяется пределом обнаружения и уровнем насыщения приемника. Линейность указывает на диапазон, в котором отношение выходной мощности к входной остается постоянным. Динамический диапазон и линейность будут определены на конечном выходе сигналов I и Q (то есть сигналов I и Q после А/Ц преобразования, определения фазы и частотной фильтрации для повышения ОСШ и удаления частотных изображений). Таким образом, при проектировании РПВ необходимо учитывать динамический диапазон как в аналоговой, так и в цифровой части приемника.

Поскольку F_{total} и полоса пропускания частот конечного выхода сигналов I и Q (т.е. B_r , определенная в разделе 6.2.5.3) являются основными параметрами, определяющими мощность шума, они выступают доминирующими факторами, влияющими на предел обнаружения, определяемый аналоговыми компонентами приемника. Подробная информация о F_{total} изложена в разделе 6.2.5.4.1. Максимальный выходной уровень МШУ и других усилителей является важным фактором, который задает уровень насыщения, определяемый аналоговыми компонентами. Следует отметить, что динамический диапазон, определяемый аналоговыми компонентами, может быть меньше, чем у МШУ, из-за аналоговых компонентов с низким максимальным входным уровнем (например, смесителя). Особенно для аналоговых компонентов с низким максимальным уровнем входного сигнала следует проектировать и регулировать уровень входного сигнала таким образом, чтобы свести к минимуму понижение динамического диапазона (см. рисунок 5.A.17).

Рассчитать линейность аналоговых компонентов приемника можно с помощью точки сжатия 1 дБ (P1dB) и потери мощности, которая представляет собой разницу уровней между P1dB и максимальным выходным уровнем. Максимальный выходной уровень каждого аналогового компонента должен быть определен таким образом, чтобы он соответствовал максимальному входному уровню АЦП. Линейность аналоговой части приемника необходимо проверить во всем диапазоне входных сигналов АЦП. Отметим, что диапазон, в котором можно регулировать усиление приемника, увеличивается с ростом потери мощности на входе АЦП (см. 6.2.5.6).

Диаграмма уровней приемника должна быть составлена таким образом, чтобы пользователь РПВ мог понять конструкцию приемника. Диаграмму уровней следует составлять как для аналоговой, так и для цифровой части приемника. Как описано выше, динамический диапазон может быть ограничен аналоговыми компонентами приемника, АЦП и цифровой обработкой сигнала. Эти ограничения не должны влиять на требования к производительности РПВ. На рисунке 5.A.17 показан пример изменений динамического диапазона (изменения $S_{\min}$ и $S_{\max}$) в аналоговой части приемника. Подробная информация о $S_{\min}$ и $S_{\max}$ изложена в разделе 6.2.5.4.1, а факторы, влияющие на динамический диапазон при цифровой обработке сигнала, описаны в разделе 6.2.5.2.

6.2.5.6 Усиление

Усиление приемника определяется как отношение выходной мощности к входной и выражается в децибелах. Точкой входа, определяющей усиление приемника, является входная клемма МШУ. Точкой выхода, определяющей усиление приемника, является точка входа АЦП. Усиление приемника определяется с учетом динамического диапазона АЦП и может быть рассчитано на основе диаграммы уровней (см. рисунок 5.A.17). При слишком малом усилении приемника квантование АЦП может снижать чувствительность радиолокатора. При слишком высоком усилении приемника насыщение принимаемых сигналов может приводить к потере динамического диапазона. С учетом этого аппаратное обеспечение РПВ должно быть спроектировано таким образом, чтобы можно было изменять усиление приемника для регулировки динамического диапазона.

6.2.5.7 Синтез сигнала в антенне с фазированной решеткой

При использовании антенны с фазированной решеткой необходимо управлять фазой сигналов, поступающих от каждого элемента антенны (подрешетки), чтобы направлять луч антенны в нужную сторону. После контроля фазы синтезируются сигналы, собранные антенными элементами.

Контроль фазы и синтез сигнала осуществляются с помощью аналоговых устройств или цифровой обработки сигнала. Цифровая обработка сигнала имеет преимущество перед использованием аналоговых устройств, поскольку она позволяет осуществлять когерентное радиолокационное формирование изображений (КРИ) и АПП (см. разделы 6.3.2 и 6.3.3). Поскольку для цифрового синтеза сигнала при КРИ и АПП необходимы сложные вычисления, эта операция должна выполняться на компьютере, оснащенном центральным процессором (ЦП) и управляемом операционной системой.

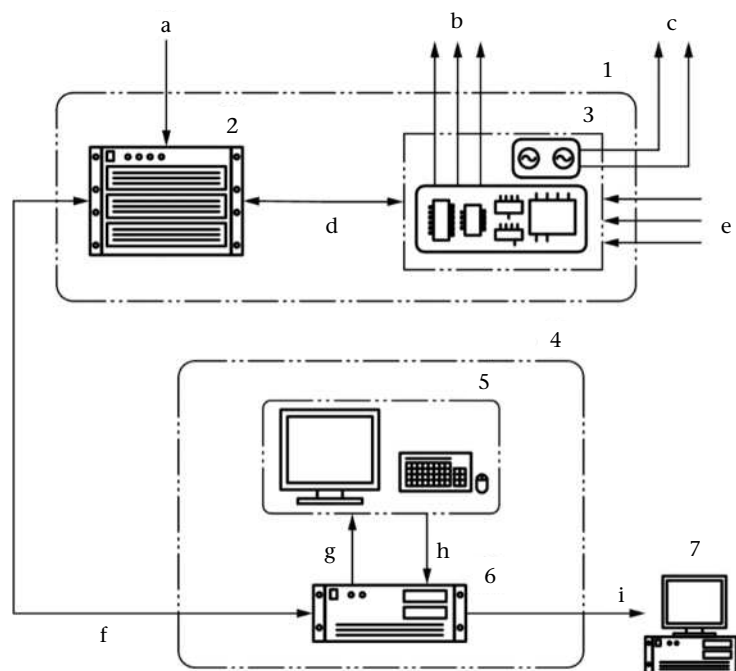
6.2.6 Блок обработки сигналов

6.2.6.1 Компоненты

На рисунке 5.A.19 представлена схематическая иллюстрация, поясняющая компоненты блока обработки сигналов и блока управления наблюдением. Как правило, блок обработки сигналов включает в себя плату центрального процессора, плату АЦП, плату для цифровой обработки сигнала в режиме реального времени (плата обработки сигнала) и блок управления РПВ.

Примечание: Плата ЦП может быть заменена на компьютер с ЦП и операционной системой.

Плата ЦП управляется операционной системой. Благодаря своей универсальности плата ЦП используется для управления другими компонентами блока обработки сигналов и для связи с блоком управления наблюдением. Для полученных сигналов плата ЦП выполняет цифровую обработку сигналов, которая не осуществляется в плате обработки сигналов. Подробная информация о цифровой обработке сигналов в блоке обработки сигналов приводится в разделе 6.2.6.2.



Обозначения:

- 1 Блок обработки сигналов. Он включает в себя пункты под номерами 2 и 3.
 - 2 Корпус, в котором установлены плата ЦП, плата АЦП и плата для цифровой обработки сигналов в режиме реального времени (плата обработки сигналов).
 - 3 Блок управления РПВ. Он состоит из платы ввода/вывода, устройств, вырабатывающих передаваемые сигналы, КООС и СТАЛО.
 - 4 Блок управления наблюдением. Он состоит из пунктов под номерами 5 и 6.
 - 5 Интерфейс для операторов, позволяющий настраивать блок управления наблюдением (например, дисплей, клавиатура и мышь).
 - 6 Рабочая станция общего назначения.
 - 7 Рабочая станция или персональный компьютер для работы с РПВ и/или сбора продуктов измерений. Он устанавливается в удаленном месте.
- a Полученные сигналы.
- b Сигналы управления.
- c Опорные волны, используемые для формирования передаваемых сигналов и обработки полученных сигналов. Они вырабатываются КООС и СТАЛО.
- d Сигналы управления и сигналы состояния.
- e Сигналы состояния от других компонентов РПВ.
- f Сигналы управления, оперативный статус и полученные сигналы.
- g Вывод для операторов.
- h Ввод данных операторами.
- i Удаленный доступ и передача данных.

Примечание:

Показан пример компонентов и функций блоков обработки сигналов и управления наблюдением. Их компоненты и функции могут быть изменены в соответствии с требованиями к конструкции и эксплуатации РПВ.

Рисунок 5.А.19. Схематическая иллюстрация, поясняющая компоненты блока обработки сигналов и блока управления наблюдением

Плата АЦП используется для оцифровки полученных сигналов. Плата обработки сигналов служит для выполнения декомпрессии полученных сигналов и когерентного интегрирования. Для обработки большого количества полученных сигналов в режиме реального времени плата обработки сигналов обычно имеет встроенную ППВМ и/или ЦПС.

Блок управления РПВ состоит из платы цифрового ввода/вывода (В/В), устройств формирования передаваемых сигналов, КООС и СТАЛО. Как правило, компоненты устройства устанавливаются в блок обработки сигналов, поскольку ими можно легко управлять с помощью платы ЦП. Плата ввода/вывода вырабатывает сигналы управления, необходимые для передачи, приема и обработки сигналов. Сигналы управления передаются другим компонентам РПВ. Например, устройствами, формирующими передаваемые сигналы, являются генератор цифровой формы волны, Ц/А преобразователь и фильтр пропускания низких частот. КООС и СТАЛО генерируют опорные волны, которые используются при передаче и приеме (см. [6.2.1](#), [6.2.4.1](#) и [6.2.5.1](#)). Блок управления РПВ также собирает сигналы состояния от компонентов РПВ.

С помощью опорного сигнала необходимо синхронизировать частоту КООС и СТАЛО и время сигналов управления. Устройство, вырабатывающее опорный сигнал (например, приемник ГСОМ, выдающий опорный сигнал 10 МГц), должно быть установлено как компонент блока обработки сигналов или другого блока РПВ.

6.2.6.2 **Функции**

Блок обработки сигналов выполняет следующие функции:

- 1) оцифровка полученных сигналов, собранных при каждой передаче;
- 2) определение дальности. При сжатии импульсов происходит декомпрессия принимаемых сигналов I и Q. Подробная информация о сжатии импульсов приводится в разделе [6.2.4.4](#);
- 3) выполнение когерентного интегрирования. Когерентное интегрирование применяется, когда необходимо уменьшить количество данных в принимаемых сигналах (см. [6.2.2](#));
- 4) получение высотного профиля вектора ветра с помощью метода ДКЛ или метода РА (см. [5.3.2](#), [5.3.3](#) и [6.2.2](#));
- 5) сбор сигналов состояния от других блоков РПВ;
- 6) выработка и распределение сигналов управления, необходимых для передачи, приема и обработки сигналов.

При осуществлении функции 1), когда определение фазы и частотная фильтрация выполняются аналоговыми устройствами, сигналы I и Q оцифровываются отдельно с помощью двух АЦП. Когда оцифровка полученных сигналов выполняется в приемнике с последующим формированием I и Q сигналов (см. [6.2.5.2](#)), то в блоке обработки сигналов оцифровка полученных сигналов не проводится.

При осуществлении функций 2) и 3) декомпрессия полученного сигнала и когерентное интегрирование выполняются для каждого канала приемника, каждого луча антенны и каждого строка диапазона. Для декомпрессии используется вертикальный профиль полученных сигналов, собранный с каждой передачи. Кроме того, когерентное интегрирование применяется к точкам временного ряда, каждая из которых собирается с каждой передачи. Ввиду большого количества получаемых сигналов, которые должны пройти обработку при декомпрессии и когерентном интегрировании, это обычно выполняется в плате обработки сигналов (см. рисунок 5.A.19). Декомпрессия

и когерентное интегрирование должны быть разработаны таким образом, чтобы динамический диапазон и точность измерений не снижались из-за избытка или недостатка числовых данных.

Частичная или полная оцифровка полученных сигналов, цифровое определение фазы, цифровая частотная фильтрация, декомпрессия полученных сигналов, когерентное интегрирование и другая обработка сигналов могут выполняться в одном и том же устройстве цифровой обработки сигналов (см. 6.2.5.2).

Полученные сигналы имеют временную задержку, обусловленную задержкой передачи в аналоговых устройствах и временной задержкой при обработке цифровых сигналов. При определении дальности от РПВ необходимо учитывать временную задержку полученных сигналов. Линия задержки — это способ проверки и калибровки диапазона. Подробная информация об определении дальности и требованиях к точности измерений приводятся в разделах 7.2 и 7.4.1, соответственно.

При осуществлении функции 4) получение параметров ветра обычно выполняется платой ЦП (см. рисунок 5.А.19). Это связано с тем, что в методе ДКЛ и методе РА принятые сигналы используются после уменьшения их количества (то есть после когерентного интегрирования), и вычисления могут быть сложными. Процедуры получения вектора ветра должны быть разработаны таким образом, чтобы динамический диапазон и точность измерений не снижались из-за избытка или недостатка числовых данных.

Контроль качества при цифровой обработке данных может осуществляться в ходе процессов формирования временных рядов полученных сигналов, получения доплеровского спектра, оценки спектральных параметров и получения вектора ветра. Подробнее о КК в цифровой обработке данных см. в разделе [раздел 8](#).

Отметим, что части обработки сигналов, перечисленные в качестве функций блока управления наблюдением, могут выполняться рабочей станцией блока управления наблюдением, если она обладает достаточными для этого возможностями.

Функция 5) выполняется в блоке управления РПВ (см. рисунок 5.А.19). Собираются сигналы состояния от других компонентов РПВ. Блок обработки сигналов формирует оперативный статус с помощью сигналов состояния, а затем посылает оперативный статус на блок управления наблюдением. Формирование оперативного статуса может осуществляться в блоке управления наблюдением.

Функция 6) также выполняется в блоке управления РПВ. Опорные волны, используемые для создания передаваемых сигналов и обработки полученных сигналов, производятся КООС и СТАЛО. Также вырабатываются сигналы управления, необходимые для передачи, приема и обработки сигналов, которые затем передаются другим компонентам РПВ. В блоке обработки сигналов также формируются передаваемые сигналы. Передаваемые сигналы поступают на передатчик, который осуществляет усиление, преобразование с повышением частоты и частотную фильтрацию передаваемого сигнала (см. 6.2.4).

6.2.7 **Блок управления наблюдением**

Блок управления наблюдением выполняет следующие функции:

- 1) предоставление оператору средств для управления работой РПВ;
- 2) выполнение процессов контроля качества, которые не выполняются в блоке обработки сигналов;
- 3) хранение продуктов измерений в устройстве хранения;
- 4) сбор, отображение и регистрация оперативного статуса.

На рисунке 5.А.19 приводится схематическое изображение блока управления наблюдением. Как правило, в блоке управления наблюдением имеется рабочая станция общего назначения с дисплеем, клавиатурой и мышью, чтобы им мог управлять оператор. С рабочей станции оператор настраивает значения параметров, используемых при передаче, приеме и обработке сигнала. Пример параметров, которые могут быть настроены оператором при передаче импульсов, и пример параметров, которые могут быть настроены при передаче НВЧМ, приведены в [Добавлении А](#). Система РПВ должна быть защищена от неправильной конфигурации параметров, которая может повредить оборудование. С рабочей станции оператор также запускает и останавливает измерения. Если необходимо осуществлять дистанционное управление РПВ и/или передавать продукты измерений в удаленное место, для удаленного доступа и/или передачи данных используется рабочая станция или персональный компьютер.

Примечание: Рабочая станция может быть заменена на персональный компьютер, если он обладает достаточными возможностями для выполнения функций блока управления наблюдением.

Блок управления наблюдением также может использоваться для осуществления процессов контроля качества, которые не выполняются в блоке обработки сигналов, а также для получения вектора ветра, если он обладает достаточными вычислительными возможностями (см. [6.2.6](#) и [раздел 8](#)).

Рабочая станция в блоке управления наблюдением также используется для хранения продуктов измерений. Информация об уровнях обработки данных и формате данных представлена в разделах [9.1](#) и [9.2](#), соответственно.

Блок управления наблюдением отслеживает оперативный статус РПВ. Если оперативный статус не формируется в блоке обработки сигналов, он формируется в блоке управления наблюдением с помощью сигналов состояния от других компонентов РПВ. Блок управления наблюдением также передает данные и регистрирует оперативный статус. В таблице 4 перечислены параметры, которые необходимо собирать для определения оперативного статуса (см. [11.2](#)). Блок управления наблюдением должен иметь возможность для отображения оперативного статуса.

Для проверки результатов измерений в режиме реального времени блок управления наблюдением должен иметь возможность для вывода продуктов измерений на дисплей. Эта функция называется быстрым просмотром (БП). Проверять результаты измерений удобно с помощью построения графиков доплеровских спектров и скорости ветра.

6.2.8 ***Учет условий окружающей среды***

Ниже перечислены условия окружающей среды, способные привести к повреждению РПВ, и меры по предотвращению, снижению или ограничению возможного ущерба:

- накопление снега на антенне и наружных корпусах. Предотвратить накопление снега непосредственно на антенне можно с помощью антенного обтекателя (см. [6.2.3.4](#));
- коррозия и повреждения из-за соли, поступающей из моря. Защитить наружные компоненты от коррозии и повреждений можно с помощью обработки наружных корпусов и труб для прокладки кабеля подходящей краской. Фильтр для предотвращения солевых повреждений может защитить компоненты РПВ от проникновения соли внутрь корпуса РПВ;
- повреждение в результате конденсации воды при низких температурах и/или высокой влажности. Предотвратить образование водяного конденсата можно с помощью надлежащей вентиляции и/или обогревателя;
- повреждение от молнии. Трансформатор напряжения с функцией защиты от перенапряжения может уменьшить ущерб, наносимый молнией.

Пользователь и поставщик должны обсудить между собой условия окружающей среды и превентивные меры. Эффективность превентивных мер может быть ограничена с учетом неожиданных суровых явлений окружающей среды и компромисса между стоимостью реализации и поддержания превентивных мер и их эффективностью.

6.3 Повышение разрешения и уменьшение помех с помощью адаптивной обработки сигнала

6.3.1 Диапазонное формирование изображений (интерферометрия в частотной области)

6.3.1.1 Общие положения

Формирование изображений по дальности (ФИД), которое также называется интерферометрией в частотной области (ИЧО), — это метод, позволяющий повысить разрешающую способность по дальности за счет использования частотного разнесения. В ФИД передаваемые частоты меняются от импульса к импульсу, а принимаемые сигналы собираются для всех частотных каналов. Фаза эхосигнала на заданном диапазоне различается на разных частотных каналах, и разность фаз определяется диапазоном, передаваемыми частотами и начальной фазой частотных каналов. ФИД повышает разрешение по дальности за счет использования разности фаз принимаемых сигналов. ФИД может использоваться, когда оно имеет преимущество перед другими методами повышения разрешающей способности по дальности (например, короткий передаваемый импульс, сжатие импульсов с фазовой модуляцией и сжатие частотно-модулированного импульса) или когда сочетание ФИД и вышеупомянутых методов является необходимым условием для достижения требуемого разрешения по дальности.

6.3.1.2 Обработка сигналов

На рисунке 5.А.20 показана схематическая иллюстрация, поясняющая процесс обработки сигналов при ФИД. Для ФИД используются сигналы, полученные на ближайшем к r диапазоне по дальности. Отметим, что ФИД можно применять в любом диапазоне измерений. Временной ряд $s(t)$, используемый для ФИД, выражается следующим образом:

$$s(t) = (s_1(t), s_2(t), \dots, s_{N_F}(t))^T \quad (5.A.45)$$

где:

t — время;

N_F — количество передаваемых частот (количество частотных каналов), которое совпадает с N_{freq} , определенным в п. 4.1;

$s_i(t)$ — сигнал, принятый i -м частотным каналом в момент времени t .

Поскольку передаваемая частота меняется от импульса к импульсу, в $s(t)$ присутствует разница во времени замеров $(N_F - 1)T_{\text{IPP}}$. Однако эта разница пренебрежимо мала по сравнению с изменениями характеристик эхосигнала во времени.

Вектор веса (w) задается следующим образом:

$$w = (w_1, w_2, \dots, w_{N_F})^T \quad (5.A.46)$$

Выходной сигнал $y(t)$, который является взвешенной суммой $s_i(t)$, выражается следующим образом:

$$y(t) = w^H s(t) \quad (5.A.47)$$

где H - эрмитов оператор (комплексно сопряженное транспонирование).

Яркость B определяется следующим образом:

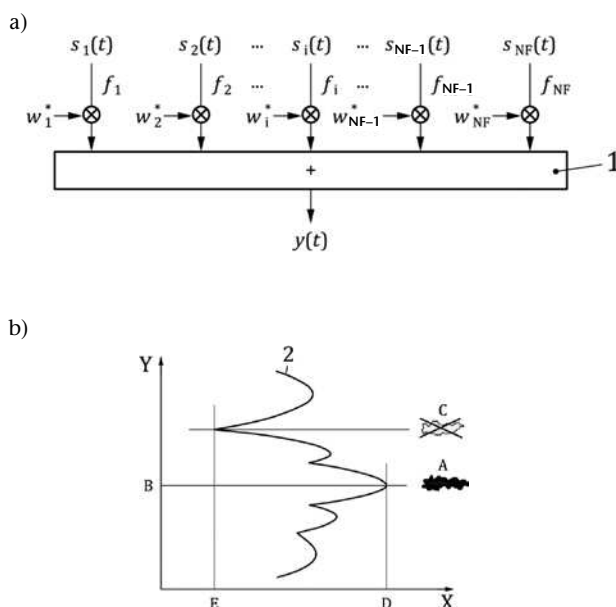
$$B = w^H R w \quad (5.A.48)$$

где R — матрица ковариаций полученных сигналов. Элемент R в i -й строке и j -м столбце выражается следующим образом:

$$r_{ij} = \sum_{p=1}^{N_{\text{data}}} s_i(t_p) s_j^*(t_p) \quad (5.A.49)$$

где N_{data} — количество точек в временном ряду, а $*$ означает комплексное сопряжение. Время первого и последнего замера t_1 и $t_{N_{\text{data}}}$, соответственно.

В общем случае w определяется с помощью адаптивной обработки сигнала по методу Капона^[21;22;23;24]. Обработка сигнала также называется методом ограниченной направленности минимизации мощности (ОНММ). При адаптивной обработке сигналов



Обозначения:

X Усиление

Y Диапазон (высота)

1 Вычисление взвешенной суммы полученных сигналов с помощью адаптивной обработки сигналов; полученные сигналы собираются с помощью нескольких передаваемых частот

2 Изменение усиления взвешенной суммы (вектор веса) в диапазоне (высота)

A Полезный эхосигнал

B Полезный диапазон (высота)

C Смягченный мешающий эхосигнал

D Постоянное усиление

E Усиление, уменьшенное в результате адаптивной обработки сигналов (вычисление взвешенной суммы полученных сигналов)

Примечание: определение символов, не указанных в обозначениях, см. в тексте.

Рисунок 5.A.20. Схематическая иллюстрация, поясняющая ФИД: а) вычисление выходного сигнала $y(t)$; б) результат регулирования усиления в диапазоне

используется ограничение диапазона, при котором фаза на полезном диапазоне r одинакова для всех полученных сигналов ($s_i(t)$), а усиление на r остается постоянным. Ограничение диапазона задается следующим образом:

$$e^H w = 1 \quad (5.A.50)$$

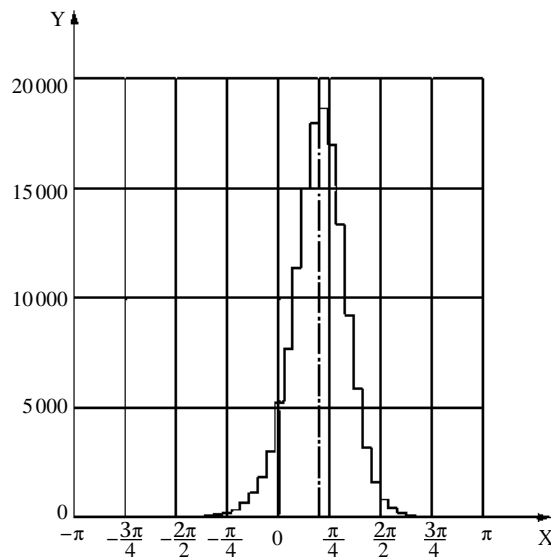
где e — вектор управления в r . e задается уравнением:

$$e = \frac{1}{\sqrt{N_F}} \left(e^{-2jk_1 r + j\varphi_1}, e^{-2jk_2 r + j\varphi_2}, \dots, e^{-2jk_{N_F} r + j\varphi_{N_F}} \right)^T \quad (5.A.51)$$

где:

- k_i — волновое число i -го частотного канала;
- φ_i — начальная фаза i -го частотного канала.
- φ_i определяется аппаратным обеспечением РПВ.

В общем случае вместо φ_i используется разность фаз $\varphi_i - \varphi_m$. Здесь m — произвольное значение. $\varphi_i - \varphi_m$ можно оценить по разности фаз между s_m и s_i . На рисунке 5.A.21 показан пример разности фаз, полученной из коэффициента корреляции между принимаемыми сигналами, собранными на разных частотных каналах. Перед вычислением коэффициента корреляции была получена вариация фазы в диапазоне, которая присутствовала во временном ряду и зависела от волнового числа полученного сигнала. На интенсивность полученного сигнала повлиял эффект взвешивания по дальности. Благодаря эффекту взвешивания по дальности интенсивность эхосигнала уменьшается по мере увеличения расстояния между дальностью эхосигнала и дальностью обнаружения (т.е. центром облучаемого объема в диапазоне) (см. 6.3.1.5). Таким образом, принимая медианное или среднее значение измеренной разности фаз как $\varphi_i - \varphi_m$, можно уменьшить ошибку оценки, связанную с неоднозначной высотой отражателя.



Обозначения:

- X Разница фаз в радианах
- Y Число

Примечание: Прерывистая линия показывает среднее значение разности фаз (0,608 рад).

Рисунок 5.A.21. Пример разности фаз между принимаемыми сигналами, собранными на разных частотных каналах

При ограничении диапазона $y(t)$ вычисляется таким образом, чтобы минимизировать сигналы из диапазонов, отличных от r (мешающие сигналы) (то есть минимизировать яркость B). Минимизация мешающих сигналов повышает разрешающую способность по дальности. W , которая минимизирует B при ограничениях уравнений 5.A.50 и 5.A.51, задается следующим образом:

$$w = \frac{R^{-1}e}{e^H R^{-1}e} \quad (5.A.52)$$

6.3.1.3 Требования к аппаратному обеспечению

Для изменения передаваемых частот, как правило, используется несколько СТАЛО. Для каждой передачи выбирается один из СТАЛО, и тот же СТАЛО используется в последовательности передачи и приема. Поскольку местные частоты меняются, обработка принимаемых сигналов на ПЧ и последующих этапах одинакова для всех РЧ. Как минимум в одном случае для реализации возможности ФИД в существующем РПВ было установлено несколько СТАЛО[25].

При ФИД следует учитывать использование нескольких передаваемых частот при сжатии импульса с фазовой модуляцией и изменении направления луча антенны. При изменении направления луча антенны после сбора временных рядов всех частотных каналов (т.е. после $N_{\text{freq}} N_{\text{pseq}} N_{\text{coh}} N_{\text{data}}$ передач и приемов), передаваемый код фазовой модуляции необходимо изменить после циклического переключения передаваемых частот (после N_{freq} передач и приемов). При изменении направления луча антенны от квазиимпульса к импульсу передаваемая частота, направление луча антенны и передаваемый код фазовой модуляции могут быть изменены следующим образом:

- 1) передаваемая частота изменяется при каждой передаче;
- 2) направление луча антенны изменяется после циклического переключения передаваемых частот (после N_{freq} передач и приемов);
- 3) передаваемый код фазовой модуляции изменяется после циклического переключения передаваемых частот и направлений лучей антенны (после $N_{\text{freq}} N_{\text{beam}}$ передач и приемов).

6.3.1.4 Преимущества и недостатки

Помимо улучшения разрешения по дальности, ФИД обладает и другими преимуществами. При использовании одной и той же полосы частот для ФИД и передачи коротких импульсов побочное излучение радиоволн (интенсивность радиоволн за пределами разрешенной полосы частот) может быть меньше в ФИД, чем при передаче коротких импульсов. Это связано с тем, что ширина передаваемого импульса, используемого в ФИД, больше, чем при передаче коротких импульсов. Хотя для ФИД используется несколько передаваемых частот, большая длительность импульса способствует снижению уровня побочного излучения[26]. Поскольку ФИД основано на идее адаптивной минимизации сигналов из нежелательных диапазонов, оно способно уменьшить загрязнение мешающими сигналами от боковых лепестков диапазона в большей степени, чем сжатие импульсов с частотной модуляцией. Отмечается, что ФИД также полезно для уменьшения помех, поскольку оно может уменьшать помехи в нежелательных диапазонах.

С другой стороны, поскольку передаваемая частота меняется при каждой передаче, f_{Nyq} и улучшение ОСШ за счет интегрирования полученных сигналов I и Q по времени (когерентное интегрирование) снижаются по сравнению с ситуацией, когда ФИД не применяется (см. 7.1.4 и 7.3). Для временного разрешения также следует учитывать использование нескольких передаваемых частот (см. 7.1.3).

Увеличить разрешающую способность по дальности также можно за счет сжатия импульсов с фазовой модуляцией, сжатия импульсов с частотной модуляцией и передачи

коротких импульсов. В то время как они имеют фиксированное разрешение по дальности, разрешение по дальности ФИД меняется в зависимости от пространственного распределения и ОСШ отражателей.

6.3.1.5 Эффект взвешивания по дальности

Поскольку разрешающая способность по дальности, достигаемая с помощью ФИД, ниже разрешающей способности, определяемой формой передаваемого импульса и частотной фильтрацией при приеме, эффект взвешивания по дальности может значительно понизить интенсивность эхосигнала и чувствительность радиолокатора. Эффект взвешивания по дальности обусловлен формой волны передаваемого импульса и частотной фильтрацией при приеме. Благодаря эффекту взвешивания по дальности интенсивность эхосигнала уменьшается по мере увеличения расстояния между дальностью эхосигнала и дальностью обнаружения (т.е. центром облучаемого объема в диапазоне). Интенсивность эхосигнала значительно уменьшается в диапазонах, соответствующих фронтам передаваемого импульса^[25]. Подробная информация о взвешивании по дальности и пример измерения приводится в п. 4.4.2 справочной литературы [2]. Формирование сигнала передаваемого импульса, частотная фильтрация при приеме, разрешающая способность по дальности и определении дальности описаны в разделах 6.2.4.3, 6.2.5.3, 7.1.1 и 7.2, соответственно.

Эффективным способом уменьшения эффекта взвешивания по дальности является сверхдискретизация, при которой дискретизация полученных сигналов ведется с интервалами, меньше разрешающей способности по дальности. Поскольку сверхдискретизация перекрывает облучаемые объемы в диапазоне, сочетание ФИД и сверхдискретизации может снизить эффект взвешивания по дальности, уменьшая максимальную разницу между полезным диапазоном (то есть r) и дальностью обнаружения полученных сигналов (то есть дальностью обнаружения $s(t)$)^[25]. Отметим, что для повышения разрешающей способности по дальности можно использовать сочетание сверхдискретизации и адаптивной обработки сигналов^[27].

6.3.2 Когерентное радиолокационное формирование изображений (интерферометрия в пространственной области)

КРИ, которое также называется интерферометрией в пространственной области (ИПО), — это метод, позволяющий повысить угловую разрешающую способность за счет использования антенных подрешеток. Из-за разницы в положении подрешеток фаза эхосигнала в определенном направлении различается на разных подрешетках. КРИ повышает угловое разрешение за счет использования разности фаз принимаемых сигналов. В общем случае вектора веса w определяется с помощью адаптивной обработки сигналов по методу Капона^[21;22;28;29]. КРИ можно применять в тех случаях, когда требуется, чтобы угловое разрешение было меньше ширины луча антенны.

На рисунке 5.А.22 показана схематическая иллюстрация, объясняющая КРИ с помощью метода Капона (ОНММ). Полученный сигнал $s(t)$ на расстоянии r и в момент времени t выражается следующим образом:

$$s(t) = \left(s_1(t), s_2(t), \dots, s_{N_{SA}}(t) \right)^T \quad (5.A.53)$$

где:

N_{SA} — количество подрешеток;

$s_i(t)$ — сигнал, полученный i -й подрешеткой в момент времени t .

w выражается следующим образом:

$$w = \left(w_1, w_2, \dots, w_{N_{SA}} \right)^T \quad (5.A.54)$$

Выходной сигнал $y(t)$ представляет собой взвешенную сумму $s_i(t)$ и выражается следующим образом:

$$y(t) = w^H s(t) \quad (5.A.55)$$

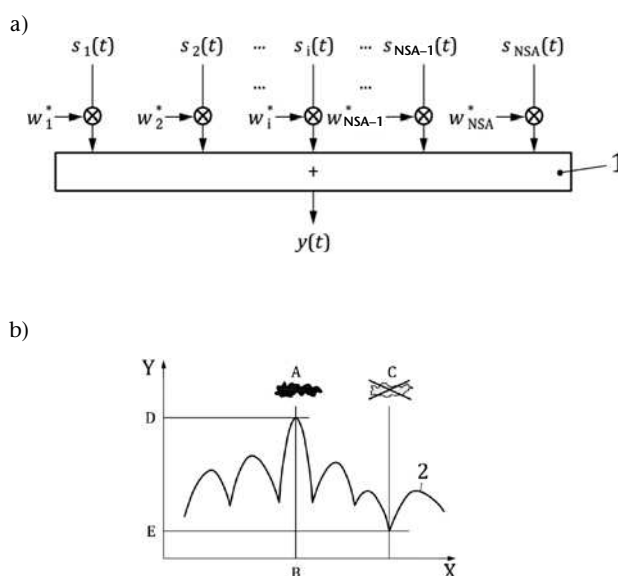
Яркость B определяется следующим образом:

$$B = w^H R w \quad (5.A.56)$$

где R — матрица ковариаций полученных сигналов. Элемент R в i -й строке и j -м столбце выражается следующим образом:

$$r_{ij} = \sum_{p=1}^{N_{\text{data}}} s_i(t_p) s_j^*(t_p) \quad (5.A.57)$$

где N_{data} — количество элементов временного ряда. Время первого и последнего замера — t_1 и $t_{N_{\text{data}}}$, соответственно.



Обозначения:

X Zenитный угол

Y Усиление

1 Вычисление взвешенной суммы полученных сигналов с помощью адаптивной обработки сигналов; принимаемые сигналы собираются антенными подрешетками

2 Изменение усиления взвешенной суммы (вектор веса) в поперечном сечении вдоль желаемого направления азимута; азимутальный угол включает противоположное ($+180^\circ$) направление

A Полезный эхосигнал

B Полезное направление

C Смягченный мешающий эхосигнал

D Постоянное усиление

E Усиление, уменьшенное в результате адаптивной обработки сигналов (вычисление взвешенной суммы полученных сигналов)

Примечания:

1. Определение символов, не указанных в обозначениях, см. в тексте.

2. На рисунке b) показаны изменения только в поперечном сечении вдоль нужного направления азимута.

В действительности усиление контролируется как в азимутальном, так и в зенитном углах.

Рисунок 5.A.22. Схематическая иллюстрация, поясняющая КРИ. а) Способ вычисления выходного сигнала $y(t)$. б) Результат регулирования усиления в угловом направлении

Ограничение направления задается следующим образом:

$$e^H w = 1 \quad (5.A.58)$$

где e — вектор управления в r . e задается уравнением:

$$e = \frac{1}{\sqrt{N_{SA}}} \left(e^{jk \cdot D_1}, e^{jk \cdot D_2}, \dots, e^{jk \cdot D_{N_{SA}}} \right)^T \quad (5.A.59)$$

где:

D_i — центральное положение i -й подрешетки;
 k — вектор волнового числа.

k выражается следующим образом:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} (\sin \phi \sin \theta, \cos \phi \sin \theta, \cos \theta) \quad (5.A.60)$$

где:

ϕ — азимутальный угол;
 θ — зенитный угол.

Отметим, что уравнение 5.A.59 составлено при том предположении, что начальная фаза каждой подрешетки откалибрована и что уровень шума одинаков для всех подрешеток.

w , которая минимизирует B при ограничениях уравнений 5.A.50 и 5.A.51, задается следующим образом:

$$w = \frac{R^{-1}e}{e^H R^{-1}e} \quad (5.A.61)$$

При КРИ угловое разрешение зависит от пространственного распределения и ОСШ отражателей. Поскольку обработка сигнала в КРИ может значительно изменить основной лепесток антенны приемника, необходимо соблюдать осторожность при интерпретации интенсивности и спектральной ширины эхосигнала в чистом воздухе.

6.3.3 Адаптивное подавление помех

Адаптивное подавление помех (АПП) — это метод адаптивного уменьшения загрязнения помехами за счет управления боковыми лепестками приемной антенны. При АПП собираются сигналы от антеннных подрешеток. Сигналы от подрешеток синтезируются таким образом, чтобы уменьшить боковой лепесток в направлении прихода помех. За счет уменьшения бокового лепестка снижается интенсивность помех. АПП отличается от КРИ уменьшением ОСШ в эхосигнале в чистом воздухе и снижением искажений главного лепестка приемной антенны. Поскольку используемый в КРИ метод Капона (ОНММ) может значительно исказить главный лепесток приемной антенны, в АПП обычно используется метод адаптивной обработки сигналов ОНММ с ограничением по норме (ОНММ-ОН)^[30;31;32]. АПП можно применять в тех случаях, когда требования к снижению помех не выполняются только за счет экранирующего ограждения и/или другой цифровой обработки сигналов. Это может потребоваться, когда необходимо повысить надежность снижения помех, например для уменьшения движущихся помех с изменяющимся направлением прихода, и для снижения помех, источник которых находится под большим углом возвышения.

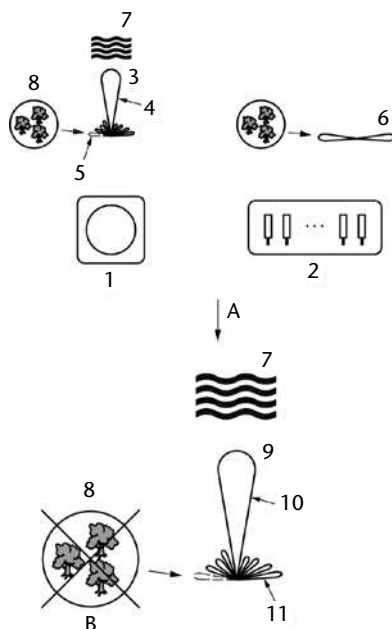
В АПП используются две конфигурации подрешеток. В первом случае используются подрешетки, образующие главную антенну^[33;34], а во втором — главная антенна и вспомогательные подрешетки^[35;36;37]. Во второй конфигурации вспомогательные подрешетки используются только для обнаружения помех, и поэтому они не обладают значительной чувствительностью к приему в направлении главного лепестка основной

антенны. На рисунке 5.А.23 показана схематическая иллюстрация, объясняющая применение АПП во второй конфигурации (использование основной антенны и вспомогательных подрешеток для обнаружения помех).

Далее следует объяснение обработки сигналов с помощью метода ОНММ-ОН. Поскольку метод ОНММ-ОН аналогичен методу ОНММ, выражения полученного сигнала $s(t)$ при диапазоне r , вектора веса w , взвешенной суммы $s_1(t)$ (то есть $y(t)$), выходной яркости B и ковариационной матрицы R в методе ОНММ-ОН будут такие же, как и в методе ОНММ (см. Уравнения 5.А.53-5.А.57). В методах ОНММ и ОНММ-ОН используется разное ограничение для определения w . Ограничения в методе ОНММ-ОН задаются следующим образом:

$$\begin{aligned} e^H w &= 1 \\ w^H w &\leq \delta \end{aligned} \quad (5.А.62)$$

где e — вектор управления в r . Первое и второе выражения выше — это ограничения по направлению и норме, соответственно. δ определяет увеличение предельного уровня шума (снижение ОСШ для эхосигнала в чистом воздухе). Ограничение по норме также способствует уменьшению искажений главного лепестка приемной антенны.



Обозначения:

- 1 Основная антенна, используемая для приема (основная антенна приемника)
- 2 Вспомогательные подрешетки для обнаружения помех
- 3 Диаграмма направленности луча основной антенны приемника
- 4 Главный лепесток основной антенны приемника
- 5 Боковые лепестки основной антенны приемника
- 6 Схема лучей вспомогательных подрешеток после синтеза сигнала с использованием метода ОНММ-ОН
- 7 Эхосигнал в чистом воздухе
- 8 Источник загрязнения полученных сигналов (например, помехи)
- 9 Положение лучей антенны после синтеза сигнала
- 10 Главный лепесток после синтеза сигнала
- 11 Боковые лепестки после синтеза сигнала
- А Вычисление взвешенной суммы полученных сигналов с помощью метода ОНММ-ОН
- В Устранение помех путем снижения уровня боковых лепестков в направлении прихода помех

Рисунок 5.А.23. Схематическая иллюстрация, поясняющая АПП с использованием основной антенны и вспомогательных подрешеток для обнаружения помех

При использовании подрешеток, образующих основную антенну, e определяется уравнением 5.A.59. При использовании основной антенны и вспомогательных подрешеток для обнаружения помех число элементов e (e_i) определяется следующим образом:

$$\begin{aligned} e_1 &= 1 \\ e_i &= 0 \quad (2 \leq i \leq N_{SA}) \end{aligned} \quad (5.A.63)$$

e_1 относится к основной антенне, а другие ($e_2, \dots, e_{N_{SA}}$) — к вспомогательным подрешеткам. Такая конфигурация означает, что сигнал, принимаемый основной антенной, не меняется, а ограничение по направлению не накладывается на сигналы, принимаемые вспомогательными подрешетками. В уравнении 5.A.63 предполагается, что количество каналов приемника для основного канала равно 1. При использовании антенны с фазированной решеткой и уравнения 5.A.63 сигналы, принимаемые подрешетками, образующими главную антенну, синтезируются аналоговыми устройствами, а затем синтезированный сигнал оцифровывается с помощью АЦП.

Примечание: для АПП могут одновременно использоваться подрешетки, образующие основную антенну, и вспомогательные подрешетки. При комбинированном использовании двух видов подрешеток элементы e для подрешеток, образующих основную антенну, аналогичны элементам, определенным в уравнении 5.A.59, за исключением того, что N_{SA} заменяется на количество подрешеток, образующих основную антенну. Число элементов e для вспомогательных подрешеток равно 0.

w , минимизирующая B при ограничениях, определяется в ходе следующих этапов^[32]:

Этап 1:

вычислите w с помощью адаптивной обработки сигнала на основе метода Капона. Метод адаптивной обработки сигнала описан в разделе 6.3.2. Когда выполнены ограничения по норме в уравнении 5.A.62 (квадрат нормы w равен или меньше δ), определяется w . Если $w^H w$ больше δ , выполняется этап 2.

Этап 2:

используя дополнительный шум, найдите w , удовлетворяющую ограничению по норме. w после добавления шума выражается следующим образом:

$$w(\beta) = \frac{(R + \beta I)^{-1} e}{e^H (R + \beta I)^{-1} e} \quad (5.A.64)$$

где:

β — величина дополнительного шума;
 I — матрица тождественности.

Отметим, что β — положительное вещественное число. Известно, что норма $w(\beta)$ монотонно убывает с ростом β . Таким образом, путем итерационного вычисления, при котором β увеличивается на каждом шаге, рассчитывается β , удовлетворяющая ограничению по норме (β_1). Для этапа 3 необходимо сохранить β_0 , которая использовалась в вычислениях непосредственно перед расчетом, в которых определялась β_1 и выполнялось ограничение по норме ($w^H w \leq \delta$ в уравнении 5.A.62).

Этап 3:

найдите минимальное значение β (далее $\beta_{\min}$), удовлетворяющее ограничению по норме. Поскольку $\beta_0 < \beta_{\min} \leq \beta_1$ и норма $w(\beta)$ монотонно убывает с ростом β , $\beta_{\min}$ определяется методом половинного деления.

Этап 4:

определите w следующим образом:

$$w = \frac{(R + \beta_{\min} I)^{-1} e}{e^H (R + \beta_{\min} I)^{-1} e} \quad (5.A.65)$$

Предполагается, что уровень шума полученного сигнала от подрешеток одинаков для всех элементов в ограничениях, выраженных уравнением 5.A.62. Однако при АПП с использованием основной антенны и вспомогательных подрешеток для обнаружения помех, уровни шума сигналов, принимаемых основной антенной и вспомогательными подрешетками, обычно не совпадают из-за аппаратных различий между основной антенной и вспомогательными подрешетками. В связи с этим перед применением АПП принимаемые ими сигналы обычно нормируются, чтобы сделать уровни шумов одинаковыми. Ограничение АПП с использованием основной антенны и вспомогательных подрешеток состоит в том, что подавление помех возможно только в том случае, если интенсивность помех от вспомогательных подрешеток существенно выше, чем от основной антенны (то есть эффективность подавления помех зависит от усиления и диаграммы направленности лучей вспомогательных подрешеток). С другой стороны, такая конфигурация имеет и преимущества. Поскольку для вспомогательных подрешеток не требуется калибровка фазы, их проще устанавливать и обслуживать, чем подрешетки, образующие основную антенну. Кроме того, АПП с использованием основной антенны и вспомогательных подрешеток можно применять даже в тех случаях, когда основная антенна не является антенной с фазированной решеткой (например, с параболической антенной). В существующем РПВ можно реализовать АПП за счет дополнительной установки вспомогательных подрешеток[37].

Примечание: в этом абзаце предполагается, что количество каналов приемника для основного канала равно 1. При использовании для АПП антенны с фазированной решеткой и уравнения 5.A.63 сигналы, принимаемые подрешетками, образующими главную антенну, синтезируются аналоговыми устройствами, а затем синтезированный сигнал оцифровывается с помощью АЦП.

Существует метод автоматического определения оптимального значения δ [38]. В этом методе результат снижения помех, полученный с помощью метода ОНММ-ОН, сравнивается с результатом, полученным с помощью метода Капона (ОНММ). Путем дальнейшей оценки эффекта уменьшения помех и увеличения уровня шума δ определяется таким образом, чтобы быть оптимальным с точки зрения эффекта уменьшения помех и потери чувствительности радиолокатора.

7. ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ СИСТЕМЫ

7.1 Разрешение

7.1.1 Разрешение по дальности

Разрешение по дальности (Δr) должно определяться следующим образом:

$$\Delta r = \frac{c \tau_p}{2} \quad (5.A.66)$$

где:

τ_p — ширина передаваемого импульса, определенная в п. 6.2.4.3;

c — скорость света ($\approx 3,0 \cdot 10^8$ м·с⁻¹).

Полное описание разрешения по дальности обеспечивается функцией взвешивания по дальности. Подробная информация о взвешивании по дальности и пример измерения приводится в п. 4.4.2 справочной литературы [2]. Формирование сигнала передаваемого импульса увеличивает степень эффекта взвешивания по дальности (см. 6.2.4.3 и 6.3.1.5).

При использовании сжатия импульсов с частотной модуляцией, при определении Δr следует учитывать улучшение разрешения по дальности за счет этого процесса. Следует отметить, что при применении фильтрации по дальности к полученным сигналам необходимо учитывать влияние фильтрации на Δr .

Определение разрешения по дальности для бистатического радара описано в п. 4.2.3 справочной литературы [1]. Обратите внимание, что в источнике [1] дана ссылка на стр. 431 источника [2].

7.1.2 **Разрешение по объему**

Облучаемый объем (V_s) определяется функцией взвешивания по дальности и диаграммой направленности лучей антенны. Для простоты V_s обычно выражается через Δr и ширину луча антенны. При предположении, что диаграмма направленности основного луча имеет нормальное распределение, V_s на определенной дальности r выражается следующим образом:

$$V_s = r^2 \Delta r \frac{\pi \theta_B \phi_B}{8 \ln 2} \quad (5.A.67)$$

где:

θ_B — полная односторонняя ширина луча половинной мощности в плоскости E антенного луча в радианах;

ϕ_B — полная односторонняя ширина луча половинной мощности в плоскости H антенного луча в радианах.

Если уравнение 5.A.67 не применяется, расчет V_s должен быть представлен в явном виде.

Определение разрешения по объему для бистатического радара описано в п. 4.2.3 справочной литературы [1]. Обратите внимание, что в источнике [1] дана ссылка на стр. 431 источника [2].

7.1.3 **Разрешение по времени**

Общий период наблюдения (T_{record}) выражается следующим образом:

$$T_{\text{record}} = T_{\text{IPP}} N_{\text{beam}} N_{\text{pseq}} N_{\text{coh}} N_{\text{data}} N_{\text{incoh}} \quad (5.A.68)$$

Определение символов в уравнении 5.A.68 см. в разделе 4.1. Когда направление луча антенны не изменяется, N_{beam} в уравнении 5.A.68 будет равно 1. Когда некогерентное интегрирование не применяется, N_{incoh} в уравнении 5.A.68 будет равно 1. В методе ДКЛ минимальное разрешение по времени обычно определяется по T_{record} , а спектральные параметры и вектор ветра вычисляются по каждому T_{record} . В методе РА минимальное временное разрешение вычисляется с помощью уравнения 5.A.68, принимая $N_{\text{beam}} = 1$ и $N_{\text{incoh}} = 1$. В ФИД T_{record} в N_{freq} раз больше, чем при использовании одной передаваемой частоты (то есть $T_{\text{record}} = T_{\text{IPP}} N_{\text{freq}} N_{\text{beam}} N_{\text{pseq}} N_{\text{coh}} N_{\text{data}} N_{\text{incoh}}$).

Вектор ветра, вычисляемый в каждом T_{record} , необходимо усреднять по времени, когда ошибка оценки доплеровской скорости эхосигнала в чистом воздухе может значительно снизить точность оценки вектора ветра, когда можно уменьшить неопределенность, вызванную пространственной неоднородностью ветра, и/или когда снижаются мелкомасштабные вариации скорости ветра, которые не нужно разрешать при измерении.

7.1.4 **Частота Найквиста и частотное разрешение доплеровского спектра**

В методе ДКЛ f_{Nyq} и частотное разрешение доплеровского спектра (интервал между элементами доплеровской скорости; Δf_d) зависят от времени изменения направления луча

антенны. При изменении направления луча антенны после сбора доплеровского спектра (после $N_{\text{pseq}} N_{\text{coh}} N_{\text{data}}$ передач и приемов) или после сбора всех доплеровских спектров, используемых при некогерентном интегрировании (после $N_{\text{pseq}} N_{\text{coh}} N_{\text{data}} N_{\text{incoh}}$ передач и приемов), f_{Nyq} и Δf_d выражаются следующим образом:

$$f_{\text{Nyq}} = \frac{1}{2T_{\text{IPP}} N_{\text{pseq}} N_{\text{coh}}} \quad (5.A.69)$$

$$\Delta f_d = \frac{1}{T_{\text{IPP}} N_{\text{pseq}} N_{\text{coh}} N_{\text{data}}} \quad (5.A.70)$$

При изменении направления луча антенны от импульса к импульсу они выражаются следующим образом:

$$f_{\text{Nyq}} = \frac{1}{2T_{\text{IPP}} N_{\text{beam}} N_{\text{pseq}} N_{\text{coh}}} \quad (5.A.71)$$

$$\Delta f_d = \frac{1}{T_{\text{IPP}} N_{\text{beam}} N_{\text{pseq}} N_{\text{coh}} N_{\text{data}}} \quad (5.A.72)$$

При использовании метода РА f_{Nyq} и Δf_d выражаются посредством уравнений 5.A.69 и 5.A.70, соответственно. Подробную информацию о времени изменения направления луча антенны см. в разделе 6.2.3.2.5.

Доплеровская скорость, соответствующая f_{Nyq} (V_{Nyq}) и Δf_d (ΔV_d), выражается через:

$$V_{\text{Nyq}} = \frac{\lambda}{2} f_{\text{Nyq}} \quad (5.A.73)$$

$$\Delta V_d = \frac{\lambda}{2} \Delta f_d \quad (5.A.74)$$

где λ — длина волны радиолокатора. Для луча антенны с зенитным углом, равным θ_e , максимальная скорость ветра, которая может быть надежно измерена без частотного искажения (V_{max}), выражается следующим уравнением:

$$V_{\text{max}} = \frac{V_{\text{Nyq}}}{\sin \theta_e} \quad (5.A.75)$$

При ФИД f_{Nyq} , Δf_d , V_{Nyq} , ΔV и V_{max} в $\frac{1}{N_{\text{freq}}}$ раз меньше соответствующих показателей, определенных в уравнениях 5.A.69—5.A.75.

7.2 Определение дальности

К параметрам, определяющим дальность, относится минимальная дальность обнаружения, интервал дискретизации и максимальная дальность обнаружения (или количество стробов дальности). При передаче импульсов следующие факторы могут не позволять собирать полученные сигналы на малых диапазонах или ухудшать качество их измерения:

- диаграмма направленности лучей антенны в ближнем поле (см. 6.2.3.2.4);
- переключение с передачи на прием;
- утечка переданного импульса в приемник;
- помехи на местности на коротких диапазонах.

Измерения на малых диапазонах можно проводить, несмотря на ухудшение качества измерений. Таким образом, пользователь и поставщик должны обсудить минимальную

дальность обнаружения. Минимальная дальность обнаружения должна быть определена таким образом, чтобы не вызывать повреждений и/или сбоев в работе системы РПВ. При передаче НВЧМ факторами, определяющими минимальную дальность обнаружения, могут стать диаграмма направленности лучей антенны в ближнем поле и помехи от земной поверхности на малых диапазонах. Если антенна-передатчик и антенна-приемник отличаются друг от друга, параллакс между двумя антеннами также может стать фактором, влияющим на минимальную дальность обнаружения.

Полученные сигналы имеют временную задержку, обусловленную задержкой передачи в аналоговых устройствах и временной задержкой при обработке цифровых сигналов. При определении дальности от РПВ необходимо учитывать временную задержку полученных сигналов (см. разделы 6.2.6.2 и 7.4.1).

Интервал дискретизации при передаче импульсов должен быть эквивалентен длительности передачи импульса или сверхдискретизирован (при использовании сжатия импульсов с фазовой модуляцией интервал дискретизации должен быть эквивалентен длительности передачи субимпульса). Сверхдискретизация способствует уменьшению неопределенности диапазона в продуктах измерений и уменьшению снижения чувствительности радиолокатора, вызванного эффектом взвешивания по дальности. Неопределенность диапазона возникает, когда отражатели неравномерно распределены на расстояниях, удаленных от центра диапазона. Благодаря эффекту взвешивания по дальности интенсивность эхосигнала значительно уменьшается вокруг диапазонов, соответствующих фронтам передаваемого импульса (см. 6.3.1.5). Функция взвешивания по дальности объясняет зависимость интенсивности эхосигнала от дальности (см. 6.3.1.5 и 7.1.1). Подробная информация о взвешивании по дальности и пример измерения приводится в п. 4.4.2 справочной литературы [2].

Максимальная дальность обнаружения при импульсной передаче обычно ограничивается за счет ИМИ, длительности передачи, задержки сигнала в аппаратуре, времени, необходимого для переключения с передачи на прием, и времени, необходимого для изменения направления луча антенны. При передаче НВЧМ необходимо проверить длительность передачи и другие параметры, чтобы определить, удовлетворяют ли они требуемой максимальной дальности обнаружения. Для повышения точности оценки мощности шума (см. 6.2.2) полезно использовать определение дальности на дальних расстояниях, на которых эхосигнал в чистом воздухе обнаруживается нечасто из-за низкой чувствительности радиолокатора.

При обнаружении эхосигнала в диапазоне, превышающем максимальный измеряемый диапазон (то есть $\frac{c(T_{IPP} - (\text{transmission duration}))}{2}$ в идеальном случае), возникает искажение

дальности. При использовании сжатия импульсов с фазовой модуляцией можно уменьшить искажение дальности за счет корреляции полученного сигнала по дальности.

7.3 Чувствительность радиолокатора и диапазон измерений

Достижимый диапазон измерений или зона обзора по высоте определяется наименьшей интенсивностью обратно рассеянной волны, которую РПВ все еще может правильно проанализировать. Радиолокационное уравнение ясно показывает, что принимаемая мощность зависит как от характеристик радиолокатора, так и от атмосферных условий. Таким образом, максимальная достижимая высота измерения зависит не только от технических характеристик радиолокатора, но и от (сильно меняющихся) рассеивающих свойств атмосферы.

Чувствительность радара следует оценивать на основе радиолокационного уравнения. Радиолокационное уравнение для моностатического радара имеет следующий вид:

$$P_r = \frac{P_t L_p \left(10^{(G_{\text{ant}}/10)} \right)^2 \lambda^2}{(4\pi)^3 r^4} V_s \eta \quad (5.A.76)$$

где:

P_r — мощность, обнаруженная на антенне в Вт, которая определяется как обнаруженная (принятая) мощность от одной передачи;

P_t — пиковая выходная мощность антенны в Вт;

L_p — коэффициент потерь, обусловленный формированием передаваемого импульса;

G_{ant} — усиление антенны, определенное в уравнении 5.A.33 и выраженное в децибелах;

λ — длина волны радиолокатора в м;

r — расстояние между радиолокатором и целью в метрах;

V_s — облучаемый объем, определенный в уравнении 5.A.67, в м³;

η — отражательная способность объема в м⁻¹.

η в уравнении 5.A.76 также можно выразить через $\langle \eta \rangle$, если необходимо четко показать, что отражательная способность объема определяется рассеивателями, которые могут быть распределены неравномерно, и что изменения рассеивателей, не разрешенные во времени и в пространстве, усреднены. Когда τ_p определяется через τ_d , L_p определяется уравнением 5.A.38 и рисунком 5.A.13. Когда τ_p определяется через $\tau_{3\text{dB}}$, коэффициент потерь не учитывается (то есть $L_p = 1$). Поскольку P_r определяется на антенне, при измерении (или вычислении) P_r необходимо учитывать усиление и потери полученного сигнала между антенной и точкой измерения (или вычисления). P_r определяется как мощность, принятая в результате одной передачи. Поскольку значение P_r зависит от сжатия импульсов, цифрового фильтрации временных рядов, интегрирования принятых сигналов по времени и некогерентного интегрирования, необходимо скорректировать их влияние при вычислении P_r . Отметим, что влияние когерентного интегрирования и сжатия импульсов в P_r учтено в коэффициенте улучшения ОСШ (I_{SNR}). I_{SNR} объясняется уравнениями 5.A.78 и 5.A.79. Общее представление радиолокационного уравнения для моностатического радиолокатора описано в [Добавлении В](#).

Пиковая выходная мощность часто определяется и/или измеряется на выходе оконечного усилителя. В таких случаях при вычислении P_t необходимо учитывать потери в линии передачи между оконечным усилителем и антенной.

Радиолокационное уравнение для бистатического радара приводится в п. 4.2.3 справочной литературы [1]. Обратите внимание, что в источнике [1] дана ссылка на стр. 431 источника [2].

Если брэгговская длина волны радиолокатора находится в инерционном интервале полностью развитой турбулентности, то отражательная способность объема η может быть соотнесена с C_n^2 . Отношение между η и C_n^2 выражается следующим образом:

$$\eta \approx 0.38 C_n^2 \lambda^{-1/3} \quad (5.A.77)$$

Уравнение 5.A.77 основано на уравнении 3.116 из справочной литературы [1].

Значение сильно зависит от атмосферных условий. Таким образом, C_n^2 используемая при оценке чувствительности радиолокатора, должна определяться для каждого конкретного случая. Следует отметить, что если брэгговская длина волны, соответствующая λ , не находится в инерционном интервале, то уравнение 5.A.77 не будет использоваться.

Подробные сведения об C_n^2 и инерционном интервале см. в разделе 5.2.1. В случае эхосигнала осадков отражательная способность объема может быть соотнесена с коэффициентом радиолокационной отражаемости гидрометеоров (см. [Добавление С](#)).

Для получения достоверных измерений полученный сигнал должен иметь минимальное ОСШ. ОСШ зависит как от принимаемой мощности, так и от шума приемника. ОСШ определяется следующим образом:

$$SNR = \frac{P_r}{P_N I_f} I_{SNR} \quad (5.A.78)$$

где:

P_N — мощность шума приемника, определенная в уравнении 5.A.44;

I_f — коэффициент потерь в линии передачи между антенной и точкой входа приемника (подробную информацию о I_f см. в разделе 6.2.5.4.2 и рис. 5.A.18).

I_f необходимо учитывать, поскольку мощность шума на антенне используется для вычисления ОСШ и поскольку P_N определяется на входе приемника.

I_{SNR} задается уравнением:

$$I_{SNR} = I_{coh} I_{pc} \quad (5.A.79)$$

где:

I_{coh} — коэффициент улучшения ОСШ за счет когерентного интегрирования;

I_{pc} — коэффициент улучшения ОСШ за счет сжатия импульсов.

Значение I_{pc} будет определено путем соответствующих измерений и/или вычислений.

I_{coh} задается уравнением:

$$I_{coh} = \sum_{m=0}^{N_{pseq} N_{coh} N_{data} - 1} \exp \left[-8 \left(\frac{\pi \sigma_v \left(m - \frac{N_{pseq} N_{coh} N_{data} - 1}{2} \right) T_{int}}{\lambda} \right)^2 \right] \quad (5.A.80)$$

где:

σ_v — ширина спектра, определяемая стандартным отклонением в м·с⁻¹;

T_{int} — интервал дискретизации.

Когда направление луча антенны изменяется после сбора доплеровского спектра (т.е. после $N_{pseq} N_{coh} N_{data}$ раз передачи и приема) или после сбора всех доплеровских спектров, используемых в некогерентном интегрировании (т.е. после $N_{pseq} N_{coh} N_{data} N_{incoh}$ раз передачи и приема), $T_{int} = T_{IPP}$. Когда направление луча антенны меняется при каждой передаче, $T_{int} = N_{beam} T_{IPP}$. Отметим, что изменение направления луча антенны со временем может быть разным для разных РПВ. Подробную информацию об изменении направления луча антенны со временем см. в разделе 6.2.3.2.5.

$$\text{Член exp} \left[-8 \left(\frac{\pi \sigma_v \left(m - \frac{N_{\text{pseq}} N_{\text{coh}} N_{\text{data}} - 1}{2} \right) T_{\text{int}}}{\lambda} \right)^2 \right] \quad (\text{член коэффициента корреляции})$$

в уравнении 5.A.80 основан на уравнении 5.171 из справочной литературы [1]. Член коэффициента корреляции предполагает, что корреляция по времени соответствует гауссовой функции. Более подробная информация о корреляции и улучшении ОСШ дискретизированных сигналов изложена в разделах 5.6.1 и 5.6.2 справочной литературы [1].

В ФИД T_{int} в N_{freq} раз больше, чем T_{int} при использовании одной передаваемой частоты. Отметим, что ФИД улучшает разрешение по дальности, но при этом понижает ОСШ.

Радиолокационное уравнение и ОСШ, которые обычно задаются пользователем, могут быть заменены на определения, описанные в уравнениях 5.A.76-5.A.80.

Чувствительность радара можно оценить, установив пороговое значение ОСШ (см., например, справочную литературу [39]) или обнаруживаемости D . D определяется как отношение пика доплеровского спектра после некогерентного интегрирования (то есть после спектрального усреднения) к интенсивности флуктуации шума после некогерентного интегрирования.

Определение D может различаться в зависимости от способа определения пика усредненной спектральной плотности мощности. Например, D может быть определена следующим образом:

$$D = \sqrt{N_{\text{incoh}}} \left(\frac{N_{\text{data}}}{N_s} \right) SNR \quad (5.A.81)$$

где N_{data} — количество элементов доплеровского спектра. Отметим, что N_{data} в уравнениях 5.A.82—5.A.84 также равно количеству элементов в доплеровском спектре. N_s — количество последовательных единиц информации, в которых эхосигнал в чистом воздухе доминирует в доплеровском спектре. Уравнение 5.A.81 основано на уравнении 7.9 из справочной литературы [1]. N_s можно определить так, чтобы оно соответствовало ширине полумощности эхосигнала в чистом воздухе [40]. Такой эталонный эхосигнал в чистом воздухе, доплеровский спектр которого имеет гауссово распределение и не содержит возмущений, можно использовать для определения N_s .

Для заданной D минимальное обнаруживаемое ОСШ (SNR_{min}) определяется следующим образом:

$$SNR_{\text{min}} = D \frac{1}{\sqrt{N_{\text{incoh}}}} \frac{N_s}{N_{\text{data}}} \quad (5.A.82)$$

Когда SNR_{min} вычисляется из D , при определении D следует учитывать ошибку оценки спектральных параметров^[16].

Обратите внимание, что в уравнениях 5.A.81 и 5.A.82 предполагается, что характеристики эхосигнала в чистом воздухе не изменяются в интервале T_{record} , определенном в уравнении 5.A.68.

D также можно определить следующим образом:

$$D = \sqrt{N_{\text{incoh}}} \left(\frac{N_{\text{data}}}{\sqrt{2\pi} (w_v / \Delta\nu)} \right) SNR \quad (5.A.83)$$

где w_v — ширина спектра, определяемая стандартным отклонением в м с⁻¹, а $\Delta\nu$ — интервал между элементами доплеровского спектра в м·с⁻¹ (разрешение доплеровского спектра по скорости). Для заданной D минимальное обнаруживаемое ОСШ (SNR_{min}) определяется следующим образом:

$$SNR_{\text{min}} = D \frac{1}{\sqrt{N_{\text{incoh}}}} \frac{\sqrt{2\pi} (w_v / \Delta\nu)}{N_{\text{data}}} \quad (5.A.84)$$

Уравнения 5.A.83 и 5.A.84 основаны на уравнениях A7 и A8 из справочной литературы [41], соответственно.

SNR_{min} , условно определенное пользователем, можно заменить на приведенные выше определения SNR_{min} .

РПВ присущи малые значения ОСШ, по крайней мере, для стробов верхнего диапазона. Таким образом, обнаружение атмосферного эхосигнала всегда можно рассматривать как статистическую задачу принятия альтернативного решения между гипотезами «атмосферный сигнал отсутствует» и «атмосферный сигнал присутствует». Консенсусное усреднение представляет собой простой, но мощный статистический метод, который можно использовать для различения (ложных) доплеровских оценок, вызванных случайными шумовыми пиками, и (правильных) оценок, обусловленных атмосферными возвратами. По сути, этот метод обеспечивает однородную (нелинейную) оценку доплеровской скорости, включая подавление выбросов^[12;41;42;43]. При использовании консенсусного метода нет необходимости устанавливать пороговое значение для ОСШ или обнаруживаемости, поскольку метод просто основан на (временной) статистике оцениваемых доплеровских моментов.

7.4 Точность измерений

7.4.1 Требования

Факторы, влияющие на точность измерений для моностатического импульсного радара, перечислены в таблице 5.A.2. Существуют различные методы проверки соответствующих факторов. Некоторые методы должны применяться при проектировании, производстве или установке. Ряд других методов следует применять при техническом обслуживании и/или эксплуатации. Для такой проверки может потребоваться опыт, время и расходы. Пользователь и поставщик должны обсудить, как будут проводиться проверки, опираясь на свой опыт и опыт других пользователей и поставщиков.

7.4.2 Валидация с помощью других способов

Метод проверки точности измерений РПВ на практике обеспечивается, когда эталонный прибор, который может измерять вертикальный профиль вектора ветра, доступен в месте установки РПВ или рядом с ним. Такие полевые испытания можно использовать для обеспечения прослеживаемости, насколько это возможно^[44]. Ограничения связаны с тем, что РПВ и все известные прослеживаемые датчики ветра имеют различные характеристики усреднения в пространстве и времени.

Таблица 5.А.2. Факторы, влияющие на точность измерений

Факторы	Пояснения
Правильная ориентация, диапазон и форма облучаемого объема	– Ориентация облучаемого объема определяется точностью наведения луча антенны и двусторонней диаграммой направленности антенны (см. 6.2.3). – При определении дальности от РПВ необходимо учитывать временную задержку полученных сигналов, обусловленную задержкой передачи в аналоговых устройствах и задержкой при обработке цифрового сигнала (см. 6.2.6 и 7.2). Линия задержки — это способ проверки и калибровки диапазона. – Угловое и дальнобойное распределение по облучаемому объему определяется двусторонней диаграммой направленности антенны и функцией взвешивания по дальности, соответственно. Определение облучаемого объема см. в п. 7.1.2.
Нормальная работа аппаратных средств	Техническое обслуживание — это средство обеспечения нормальной работы аппаратных средств в течение жизненного цикла РПВ (см. раздел 11).
Корректное обнаружение полезных эхосигналов, используемых для определения скорости ветра	– Контроль качества в цифровой обработке сигнала является фактором, влияющим на корректное обнаружение полезных эхосигналов (см. раздел 8). – Загрязнения из-за помех и интерференции могут препятствовать корректному обнаружению полезных эхосигналов. Помехи и интерференция описаны в разделах 5.2.3, 5.2.4, 10.5 и 10.6.
Корректное определение доплеровского смещения и других свойств принятого эхосигнала, напряжение которого было сгенерировано обратно рассеянной электромагнитной волной (например, спектральных параметров)	– Подробная информация об спектральных параметрах изложена в разделе 5.1. – Когда полезные эхосигналы хорошо отделены от помех и/или интерференции, точность оценки спектральных параметров зависит от ОСШ. Оценка ошибок спектральных параметров с учетом ОСШ описывается в разделах 6.3, 6.4 и 6.5 справочной литературы [2].
Корректная оценка обоснованности предположений, которые в неявном виде используются в алгоритме получения данных о ветре, таких как горизонтальная однородность и стационарность	– Методы измерения скорости ветра описаны в разделе 5.3. Допущения в методе ДКЛ и технике РА описаны в разделах 5.3.2 и 5.3.3, соответственно. – Использование способов уменьшения ошибок, вызванных колебаниями ветра во времени и пространстве (например, усреднение по времени), позволяет уменьшить неопределенность при получении параметров ветра.

Ниже перечислены факторы, которые необходимо принимать во внимание при проведении такого взаимного сравнения:

- лучшее согласование разрешающей способности измерений (во времени и пространстве) способствует уменьшению неопределенностей в ходе взаимного сравнения. Однако часто РПВ и эталонный прибор имеют разную разрешающую способность измерений. Усреднение по времени и/или высоте — это способы уменьшения неопределенности, вызванной разницей в разрешающей способности измерений. Полезным средством проверки также является статистическое взаимное сравнение с помощью регрессионного анализа. Увеличение количества точек данных и повышение качества данных способствуют повышению надежности статистического взаимного сравнения. Было показано, что для такого взаимного сравнения целесообразно использовать доплеровские лидары и радиозонды^[7;45;46;47;48];
- нельзя допускать возникновения радиоволновой интерференции между РПВ и прибором, используемым для валидации. По этой причине нельзя размещать рядом друг с другом два радара, использующих одну и ту же длину волны;

- следует проявлять осторожность, если для взаимного сравнения используется датчик, находящийся в точке, поскольку это может повлиять на точность измерений РПВ. Например, привязной аэростат может создавать длительные помехи для РПВ. Если датчик, находящийся в точке, сам становится помехой, его следует исключить из взаимного сравнения.

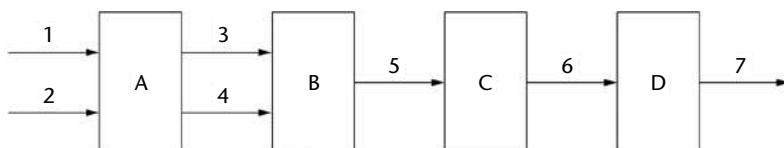
Еще одним способом изучения неопределенностей в продукции о ветре, полученной с помощью РПВ, является сравнение продукции о ветре, полученной с помощью РПВ, с продукцией, полученной с помощью атмосферной модели (например, мезомасштабной модели и объективного реанализа). Следует отметить, что для проведения взаимного сравнения с использованием атмосферной модели метеорологам могут потребоваться специальные знания и навыки. При ассимиляции продукции о ветре, полученной с помощью оперативных РПВ, в атмосферных моделях можно оценить влияние такой ассимиляции (см. [Добавление D](#)).

Для проведения взаимного сравнения РПВ с другими методами необходим опыт, время и расходы. Пользователь и поставщик должны обсудить, как будет проводиться взаимное сравнение, основываясь на своем опыте и опыте других пользователей и поставщиков.

8. КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА (КК) В ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКЕ СИГНАЛОВ

На рисунке 5.А.24 показаны этапы контроля качества при цифровой обработке полученных сигналов. Контроль качества при цифровой обработке сигналов может осуществляться на нескольких этапах.

- КК при обработке сигналов для получения сигналов I и Q после интегрирования по времени (этап 1). Например, может быть проведен контроль качества для отфильтровывания мешающих эхосигналов из временных рядов I и Q^[49].
- КК при обработке сигналов для получения доплеровского спектра (этап 2). Например, может быть проведен контроль качества для удаления мешающих эхосигналов из доплеровского спектра^[50;51].



Обозначения:

- 1 Сигналы I до когерентного интегрирования (то есть интегрирования по времени)
- 2 Сигналы Q до когерентного интегрирования
- 3 Сигналы I после когерентного интегрирования
- 4 Сигналы Q после когерентного интегрирования
- 5 Доплеровский спектр после некогерентного интегрирования
- 6 Спектральные параметры и вектор ветра до проверки согласованности
- 7 Спектральные параметры и вектор ветра после проверки согласованности
- A КК при обработке сигналов для получения сигналов I и Q после когерентного интегрирования (этап 1)
- B КК при обработке сигналов для получения доплеровского спектра (этап 2)
- C КК при обработке сигналов для оценки спектральных параметров эхосигнала в чистом воздухе и вектора ветра (этап 3)
- D Контроль качества путем проверки согласованности спектральных параметров и/или вектора ветра (этап 4)

Примечание: на рисунке показан пример с использованием метода ДКЛ.

Рисунок 5.А.24. Пример этапов контроля качества в цифровой обработке сигналов

- КК при обработке сигналов для оценки спектральных параметров эхосигнала в чистом воздухе и вектора ветра (этап 3). Например, может быть проведен КК для уменьшения негативного влияния мешающих эхосигналов, загрязняющих оценку спектральных параметров эхосигнала в чистом воздухе^[52;53;54].
- Контроль качества путем проверки согласованности спектральных параметров и/или вектора ветра (этап 4). Ручной контроль качества, осуществляемый оператором, обычно основан на проверке согласованности измеряемых параметров и/или продуктов по времени и высоте. Такие тесты на согласованность также можно автоматизировать^[55]. Хотя как ручной, так и автоматический контроль качества подразумевает дополнительные затраты по сравнению с использованием только автоматического контроля качества, использование как ручного, так и автоматического контроля качества улучшает качество продуктов измерений, получаемых с помощью РПВ.

Отметим, что пример использования метода ДКЛ приведен на рисунке 5.А.24. Осуществление КК для РПВ зависит от цифровой обработки сигналов РПВ. Подробные сведения о блоке обработки сигналов и блоке управления наблюдением см. в разделах 6.2.6 и 6.2.7 соответственно.

Поскольку цифровая обработка сигналов различается в разных РПВ, решение о внедрении КК для РПВ должно приниматься в ходе обсуждения между пользователем и поставщиком. В качестве примера контроля качества в [Добавлении Е](#) приводится управление качеством в Сети профилометров ветра и системе сбора данных (WINDAS) Японского метеорологического агентства (ЯМА)^[56].

Изучение значений контрольных параметров, в случае их предоставления КК, может способствовать улучшению показателей КК. Предпочтительно, чтобы результаты измерений, полученные с помощью РПВ, оценивались пользователем. Поставщик должен предоставить необходимую техническую информацию и опыт для проведения оценки.

9. ПРОДУКТЫ И ФОРМАТ ДАННЫХ

9.1 Продукты и уровни обработки данных

Данные, передаваемые от поставщика продукта к конечным пользователям (далее — данные, используемые конечными пользователями), и другие данные могут обрабатываться на разных уровнях. Для данных, используемых конечными пользователями, структура уровней обработки данных должна соответствовать правилам, установленным ВМО (см. справочную литературу [57] и таблицу IV.4 в [58]). Уровни обработки данных РПВ определяются следующим образом:

- **Уровень 1:** основными показателями измерений РПВ являются спектральные параметры (P_{echo} , V_r , ширина спектра) и мощность шума. В качестве альтернативы мощности шума можно использовать ОСШ. Во избежание неправильного толкования ширина спектра (σ_{std} или σ_{3dB}) и мощность шума (P_n или p_n) должны быть четко определены при проектировании и производстве РПВ. Данные Уровня 1 должны быть зафиксированы.
- **Уровень 2:** вектор ветра, показанный в уравнении 5.А.13. Геофизическая продукция, необходимая конечным пользователям, классифицируется как относящаяся к Уровню 2. Не обязательно включать в продукт компоненту w , если пользователь согласен с этим. Данные Уровня 2 должны быть зафиксированы.

Для данных, помимо используемых конечными пользователями, уровни обработки данных могут классифицироваться более подробно. Пример уровней обработки данных, не используемых конечными пользователями, приводится в [Добавлении F](#).

Кроме того, высотные профили виртуальной температуры могут быть измерены с помощью системы радиоакустического зондирования (РАСС)^[59]. Подробная информация о РАСС приводится в разделе 7.4 справочной литературы [1]. Поскольку РАСС издает звук, следует принимать меры предосторожности в связи с повышением уровня шума в ее окрестностях. Необходимо принимать меры по защите операторов от повреждений слуха.

9.2 **Формат данных**

9.2.1 **Общие положения**

Как правило, продукты измерений, полученные с помощью РПВ, сохраняются в цифровых файлах (далее — файлы данных). В этом разделе изложены общие рекомендации в отношении нескольких конкретных форматов данных.

9.2.2 **Формат оперативных данных (ВМО BUFR)**

Для международного обмена данными и распространения наблюдений ВМО поддерживает стандартный кодовый формат в виде таблично ориентированного кода FM-94 BUFR^[60]. Двоичная универсальная форма для представления метрологических данных (BUFR) относится к категории таблично ориентированных кодовых форм, в которых значение элементов данных определяется путем обращения к набору таблиц, которые хранятся и поддерживаются отдельно от самого сообщения. Он был создан в 1988 году с целью замены символьно-ориентированных позиционных метеорологических кодов.

Сообщение BUFR состоит из шести разделов, пронумерованных от нуля до пяти. Разделы 0, 1 и 5 содержат статические метаданные, в основном предназначенные для идентификации сообщений. Раздел 2 является необязательным; если он используется, то может содержать произвольные данные в любой форме по желанию автора сообщения. Раздел 3 содержит последовательность так называемых дескрипторов, которые определяют форму и содержание продукта данных BUFR. Раздел 4 представляет собой поток битов, содержащий основные данные сообщения и значения метаданных, как указано в разделе 3. Наиболее важными являются раздел 3 (раздел описания данных) и раздел 4 (раздел данных). Раздел описания данных (РОД) содержит серию дескрипторов, называемую «последовательностью». Это выражает форму и содержание данных. Раздел данных представляет собой поток битов, содержащий закодированные числовые значения в соответствии с шаблоном РОД. Шаблон BUFR представляет собой последовательность дескрипторов BUFR, которая полностью выражает форму и содержание продукта данных BUFR и признается ВМО в качестве канонической формы продукта. Шаблоны предназначены для удовлетворения требований конкретного типа данных.

Большинство данных РПВ, используемых в оперативном режиме национальными метеорологическими службами, кодируются в виде сообщений BUFR и передаются через Глобальную систему телесвязи ВМО. Как объясняется в разделе 9.1, эти данные, как правило, относятся к Уровню 2. В настоящее время используются различные шаблоны BUFR, и сейчас ведется работа по их унификации^[61]. В отношении BUFR, используемой ЯМА, вместо справочной литературы [61] следует обратиться к [Добавлению С](#).

9.2.3 **Научный формат данных (NetCDF)**

Общий сетевой формат данных (NetCDF)^[62] — это популярный машинезависимый формат данных, который поддерживает простое создание данных, ориентированных на массивы данных, доступ к ним и обмен ими с помощью набора программных библиотек. Он специально разработан для независимого от платформы хранения самостоятельно описываемых данных с тем, чтобы пользователи могли понимать данные без необходимости обращаться к внешним ресурсам, а также чтобы обеспечить

эффективный доступ к данным целиком или по частям (деление данных на подмножества). Такие вопросы, как порядок следования байтов, решаются в программных библиотеках. Этот подход был инициирован в 1989 году и до сих пор находится под управлением программы Unidata при Корпорации университетов для исследований атмосферы (ЮКАР) и поддерживается ей.

NetCDF, по сути, является самостоятельно описываемым форматом, и заголовке описывается структура остальной части файла (например, массивов данных), а также содержатся произвольные метаданные, представленные в виде пар «наименование-значение». Этот формат широко поддерживается рядом научных программных инструментов и поэтому очень популярен в метеорологическом сообществе. В науках о Земле для упрощения обмена данными часто используются условные обозначения для метаданных по климату и прогнозу (КП). В качестве примера формата NetCDF в [Добавлении Н](#) описан формат данных для профилометра ветра Метеорологической службы Германии, которая использует netCDF4.

9.2.4 **Формат данных, определяемый пользователем и/или поставщиком**

Если не используется ни BUFR, ни netCDF, формат файла данных, определенный пользователем и/или поставщиком, может меняться в зависимости от договоренностей и потребностей пользователя и поставщика. Общие рекомендации по форматированию данных, определяемые пользователем и/или поставщиком, заключаются в следующем:

- можно хранить продукты измерений, уровни обработки данных которых отличаются от описанных в пункте 9.1. Пример уровней обработки данных, помимо тех данных, которые обычно используются конечными пользователями, приводится в [Добавлении F](#);
- формат данных должен содержать заголовок и часть с данными;
- продукты измерений, полученные с помощью РПВ, хранятся в части с данными;
- в таблице 5.А.3 перечислены возможные параметры, которые могут сохраняться в части с заголовком формата данных, определенного пользователем и/или поставщиком. Параметры, хранящиеся в части с заголовком, необходимо определить на основе обсуждения между пользователем и поставщиком. Можно добавить место для хранения комментария оператора, так как это удобно для записи замечаний при измерениях;
- для параметров, связанных с измерением и продуктами измерений, необходимо определить их тип данных, чтобы не утратить содержащуюся в них фундаментальную информацию при преобразовании типа данных, выполняемом при их сохранении в файле данных;
- правило обработки имени файла данных должно быть определено на основе обсуждения между пользователем и поставщиком;
- когда поставщик определяет формат файла, он должен предоставить пользователю документацию о формате данных.

9.2.5 **Другие рекомендации**

Если конечный пользователь использует файл данных, могут потребоваться документы или другие источники информации, поясняющие параметры, хранящиеся в файлах данных. Также могут понадобиться документы или другие источники информации, полезные для работы с данными. В таких случаях документы и/или метаданные могут быть предоставлены через Интернет. Метаданные также могут храниться в файлах данных. ВМО выпустила публикацию о стандартах метаданных^[63].

Таблица 5.А.3. Возможные параметры, которые могут сохраняться в части с заголовком формата данных, определенного пользователем и/или поставщиком

№	Параметры
1	Дата и время проведения измерения ^а
2	Параметры, используемые при передаче, приеме и обработке сигналов в режиме реального времени ^б
3	Информация о размерности и длине записи продуктов, хранящихся в части с данными ^с
4	Местоположение РПВ (широта, долгота и средний уровень моря) ^д
5	Параметры аппаратуры РПВ, которые могут быть использованы для анализа данных (например, ширина луча антенны) ^е

^а Удобно для идентификации продуктов.

^б Удобно для определения режима измерения.

^с Необходима для считывания значений продуктов измерения, сохраненных в части с данными.

^д Укажите информацию о месте, где проводилось измерение.

^е Удобно для проведения анализа данных.

При интерполяции и/или экстраполяции данных по высоте и/или во времени такие данные должны быть помечены при сохранении в файле данных. Помечая интерполированные и экстраполированные данные, пользователи могут определить, являются ли сохраненные данные реальными или они получены искусственно путем интерполяции или экстраполяции.

10. УСТАНОВКА

10.1 Общие аспекты

Место установки РПВ должно отвечать следующим требованиям:

- лицензирование радиопередачи;
- разрешение на использование земельного участка для строительства и эксплуатации РПВ;
- инфраструктура.

В ходе обследования, определяющего место установки, необходимо изучить условия проведения измерений, которые влияют на качество продуктов измерений, получаемых с помощью РПВ. Необходимо изучить следующие аспекты:

- помехи;
- интерференция от источников радиоизлучения. Как радиостанции, так и машины, излучающие электромагнитные волны, могут стать источниками радиоволн, вызывающих интерференцию.

В разделах с [10.2](#) по [10.6](#) подробно описаны детали, относящиеся к установке.

10.2 Участок

При выборе места установки необходимо учитывать следующие факторы:

- оно должно быть достаточно большим для установки РПВ и сопутствующего оборудования;
- главный лепесток антенны не должен быть заблокирован (даже частично). Это условие должно выполняться для всех направлений луча антенны;
- место установки должно быть выровнено, если это необходимо для установки РПВ и соответствующего оборудования;
- необходимо обеспечить достаточное отведение воды для защиты РПВ от наводнений;
- необходимо иметь возможность доставить на место установки инструменты, используемые при установке, эксплуатации и обслуживании РПВ;
- если необходимо защитить место установки от проникновения посторонних лиц и животных, его следует огородить.

10.3 Лицензирование радиопередачи

До обследования участка и инфраструктуры или одновременно с этим необходимо провести исследование для получения лицензии на радиостанцию. Возможно, что радиопередача не будет лицензирована из-за наличия существующей радиостанции в непосредственной близости от места, предназначенного для установки РПВ. Даже если лицензирование разрешено, возможно, потребуется немало времени, чтобы устранить вопросы, связанные с радиоволновой интерференцией. Распределение частот, рекомендованное МСЭ, описано в разделе 6.1.

10.4 Инфраструктура

Ниже перечислены факторы, которые необходимо учитывать в отношении инфраструктуры.

- Для работы РПВ необходим источник электропитания. Напряжение и мощность электросети должны соответствовать требованиям РПВ. Для защиты РПВ от повреждения большими токами необходимо установить автоматические выключатели цепи с соответствующими номинальными токами. Для обеспечения безопасного электроснабжения необходимо провести обследование электрического заземления, выполненного электроэнергетической компанией. Необходимо установить источник бесперебойного питания с двойным преобразованием, защищающий от перебоев в подаче электроэнергии. Стихийные бедствия, такие как землетрясения и тайфуны, могут приводить к довольно продолжительным сбоям в работе электросетей. Если необходимо, следует установить частный электрогенератор, чтобы РПВ продолжал функционировать даже при длительном отключении электросети.
- Необходимо предусмотреть средства защиты РПВ от повреждения в результате сбоя питания (например, ИБП или автоматическое отключение системы РПВ) и перезапуска компьютера РПВ. Трансформатор напряжения с функцией защиты от перенапряжений может защитить РПВ от повреждений, вызванных ударом молнии.
- Дорога к месту установки РПВ должна подходить для транспортировки всех инструментов и оборудования, используемых при установке, эксплуатации и обслуживании.

- В случае эксплуатации РПВ без обслуживающего персонала необходимы средства телекоммуникации для отслеживания операционного состояния и передачи результатов измерений. Пропускная способность линии связи должна быть достаточной для отслеживания операционного состояния и передачи результатов измерений.
- В случае эксплуатации РПВ без обслуживающего персонала необходимо установить систему дистанционного мониторинга для выявления правонарушителей.
- Необходимо обеспечить водоснабжение, если это необходимо для эксплуатации и/или обслуживания РПВ (например, для очистки).

10.5 Помехи

При обследовании места установки следует изучить возможные источники помех. Металлические конструкции вблизи РПВ (например, башни и здания) могут усиливать помехи, поскольку они рассеивают передаваемые радиоволны. Холмы, горы и металлические конструкции являются источниками помех на местности. Вращающиеся объекты (например, ветряные турбины и вращающиеся антенны) также являются источниками помех на земной поверхности. Морская поверхность вызывает морские помехи. Транспортные средства, поезда и корабли являются источниками движущихся помех на суше или в море. Летающие объекты (такие как самолеты, птицы, летучие мыши и насекомые) являются источниками движущихся помех в небе. Эти аспекты следует учитывать, если имеется несколько возможных участков для установки РПВ. Более подробную информацию об помехах см. в разделе 5.2.3.

При определении места установки приоритетное значение должны иметь измерения РПВ. Однако, если есть несколько возможных участков для установки РПВ, желательно установить РПВ в том месте, где негативное влияние помех на качество продуктов измерения будет сведено к минимуму. Как правило, для установки РПВ не подходят возвышенности с хорошим круговым обзором, городские районы, прибрежные зоны, горные районы, а также места вблизи магистральных дорог и железных дорог. Также не подходят места вблизи конструкций с высоким содержанием металла. Наоборот, для установки РПВ подходят долины и низины, где излучение боковых лепестков антенны хорошо закрыто грунтом, окружающим РПВ. Также подходят равнины, где мало металлических конструкций или они совсем отсутствуют. Однако с практической точки зрения часто бывает трудно выбрать место установки, где качество продуктов измерения не будет снижаться из-за загрязнения принимаемых сигналов помехами.

Если помехи не позволяют РПВ обеспечить требуемое качество продуктов измерений, следует принять контрмеры по борьбе с помехами. Одним из способов уменьшения помех является установка вокруг РПВ экранирующего ограждения. Если направление прихода помех фиксировано, то увеличение ослабляющей способности экранирующего ограждения в направлении прихода помех также является способом их уменьшения. Способность к ослаблению помех может быть повышена за счет увеличения высоты ограждения. Однако оптимальную высоту для уменьшения помех часто не удастся правильно рассчитать с помощью компьютерного моделирования, и поэтому оптимальное расположение следует определять экспериментально. Ослабляющая способность металлического экранирующего ограждения также может быть увеличена за счет двухслойного ограждения.

Одним из способов уменьшения помех также является АПП и контроль качества при цифровой обработке данных (см. 6.3.3 и раздел 8).

10.6 Интерференция от источников радиоизлучения

При обследовании места установки следует изучить радиоволновую обстановку. Это особенно важно, если частотное распределение РПВ является лишь вторичным, а основным пользователем спектра является другая служба. В этом случае они вполне могут сосуществовать, но необходимо провести тщательную оценку. Подробная информация об интерференции от источников радиоизлучения приводится в разделе 5.2.4. Таким образом, желательно устанавливать РПВ в таком месте, где интерференция не будет мешать его работе. Однако, как и в случае помех (см. 10.5), часто бывает трудно выбрать место установки, где качество продуктов измерения не будет снижаться из-за загрязнения принимаемых сигналов интерференцией.

Если интерференция от источника радиоизлучения не позволяет РПВ обеспечить требуемое качество продуктов измерения, следует принять меры по борьбе с ней. Как и в случае с помехами, снизить уровень интерференции можно с помощью экранирующего ограждения. Если интерференция возникает из-за перекрестной модуляции в приемнике или из-за частотного рассогласования при выборке данных, снизить уровень интерференции можно также с помощью полоснозаграждающего фильтра. Ослабить интерференцию можно также за счет снижения уровня бокового лепестка антенны в направлении прихода интерференции. Для РПВ с антенными подрешетками интерференцию можно уменьшить с помощью АПП. Следует отметить, что интерференция от источника радиоизлучения часто не подавляется с помощью цифровой обработкой сигнала, поскольку излучение радиоволн от источника радиоизлучения, помимо РПВ, не синхронизировано с временем приема РПВ.

11. МОНИТОРИНГ И ОБСЛУЖИВАНИЕ СИСТЕМЫ

11.1 Общие аспекты

Для того чтобы РПВ долгие годы не утрачивал свои измерительные возможности, необходимо проводить техническое обслуживание. Работы по техническому обслуживанию подразделяются на следующие категории:

- мониторинг рабочего состояния;
- профилактическое техническое обслуживание;
- внеплановое техническое обслуживание;
- другие виды обслуживания.

Планирование технического обслуживания включает в себя следующие пункты:

- людские ресурсы: операторы для мониторинга рабочего состояния и инженеры, обладающие техническими знаниями, необходимыми для проведения технического обслуживания. При выполнении простых работ по техническому обслуживанию инженеров могут заменить технические специалисты;
- составление бюджета на оплату труда и приобретение запасных частей;
- руководства по мониторингу рабочего состояния и простым видам работ по техническому обслуживанию;

- письменные стандартные оперативные процедуры для связи внутри организации пользователя, внутри организации поставщика, а также между пользователем и поставщиком;
- письменные стандартные оперативные процедуры для регистрации и обмена информацией о рабочем состоянии, профилактическом и внеплановом техническом обслуживании.

Необходимо, чтобы планирование и проведение технического обслуживания осуществлялось при тесном взаимодействии между пользователем и поставщиком. С практической точки зрения, стоимость технического обслуживания является одним из важных факторов при эксплуатации РПВ. Следует учитывать экономическую эффективность при условии соблюдения всех основных требований к техническому обслуживанию.

11.2 Мониторинг рабочего состояния

Необходимо контролировать, передавать и регистрировать рабочее состояние. Информацию о рабочем состоянии необходимо собирать автоматически. Параметров, собираемых для определения рабочего состояния, должно быть достаточно для выявления значительных неисправностей аппаратуры РПВ. В таблице 5.А.4 приведены параметры, которые необходимо собирать для определения рабочего состояния.

Рабочее состояние должно отображаться на дисплее, установленном в месте наблюдения. В случае эксплуатации без обслуживающего персонала операторы должны иметь возможность получать информацию о рабочем состоянии с помощью удаленного доступа или других средств.

11.3 Профилактическое техническое обслуживание

При непрерывной эксплуатации РПВ необходимо регулярно проводить профилактическое обслуживание. Профилактическое обслуживание включает в себя проверку состояния, визуальный осмотр, контроль с помощью измерений и замену деталей. Перечень

Таблица 5.А.4. Параметры, которые необходимо собирать для определения рабочего состояния

<i>Параметры</i>	<i>Информация</i>
Передачик	Нормальная работа или с отклонением от нормы ^а
Приемник	Нормальная работа или с отклонением от нормы ^б
Электропитание	Нормальное или с отклонением от нормы ^с
Охлаждающий вентилятор или температура	Нормальная работа или с отклонением от нормы ^д
Функционирование	Время начала и окончания ^е

^а Например, контролируется выходная мощность оконечного усилителя.

^б Например, контролируется усиление МШУ.

^с Например, контролируется напряжение или состояние блоков питания, установленных в качестве компонента РПВ.

^д Например, контролируется состояние охлаждающего вентилятора, установленного в качестве компонента РПВ, и температура в наружном блоке.

^е Размер файлов данных может контролироваться пользователем при необходимости.

Примечания:

1. При необходимости пользователь может отслеживать температуру в метеорологической будке, коммерческое энергоснабжение и состояние батареи ИБП.
2. Для выявления правонарушителей можно контролировать вход в метеорологическую будку.

работ и график профилактического обслуживания должны определяться на основе обсуждения между пользователем и поставщиком. Ниже перечислены факторы, которые следует учитывать при формировании перечня работ и графика профилактического обслуживания:

- продолжительность работы (срок службы) РПВ;
- допустимое время простоя РПВ;
- качество продуктов измерения, полученных РПВ;
- расходы на профилактическое обслуживание;
- ожидаемый срок службы деталей РПВ, определяемый статистической функцией надежности и производными параметрами, такими как среднее время между сбоями (СВМС) или средняя наработка на отказ (СННО), опыт пользователя и поставщика, условия эксплуатации (включая влияние места установки) и гарантийный срок службы деталей.

Примечание: для полезного вероятностного прогнозирования отказов на основе СВМС необходимо, чтобы система работала в течение своего «срока полезного использования», который характеризуется относительно постоянной частотой отказов (средняя часть так называемой «U-образной кривой распределения»).

В таблице 5.A.5 приведен примерный перечень рекомендуемых работ по профилактическому обслуживанию. Отметим, что перечень работ может меняться при каждом профилактическом техническом обслуживании, поскольку техническое обслуживание может проводиться по этапам в зависимости от того, сколько лет прошло с момента установки РПВ и каков срок службы его компонентов.

За исключением простых работ, которые могут выполняться техническим персоналом, регулярное техническое обслуживание должно проводиться инженерами, обладающими экспертными знаниями о системе РПВ и уполномоченными поставщиком.

11.4 **Внеплановое техническое обслуживание**

Внеплановое техническое обслуживание проводится в случае неисправности РПВ. Для того чтобы обеспечить быстрое восстановление после сбоя, необходимо предусмотреть процедуру для определения того, к кому обращаться для устранения неисправности. Кроме того, пользователь и поставщик должны иметь общий доступ к журналу контроля рабочего состояния и журналу профилактического и внепланового обслуживания.

11.5 **Измерительные приборы**

Ниже перечислены основные измерительные приборы, используемые при техническом обслуживании:

- спектроанализатор;
- генератор сигналов;
- осциллограф;
- сетевой анализатор или векторный сетевой анализатор;
- частотомер;

Примечание: частотомер можно заменить другим прибором, способным измерять частоту.

Таблица 5.А.5. Примерный перечень рекомендуемых работ по профилактическому обслуживанию

Элементы	Рекомендуемые места проведения работ или проверок	Рекомендуемые работы для предотвращения ухудшения характеристик
Компоненты, устанавливаемые снаружи ^а	– Повреждение в результате удара и/или износ, связанный со временем – Гидроизоляция – Очистка	Ремонт или замена
Пылеулавливающий фильтр	Очистка	Замена ^б
Вентилятор для охлаждения	Очистка	Замена
Источник питания постоянного тока	Выходное напряжение	Замена
Антенна	– S11 (КСВН или обратные потери) и S21 (комплексное линейное усиление)^с – Рекомендуемые работы и проверки перечислены в разделе «Компоненты, устанавливаемые снаружи»	Замена
Передатчик	– Максимальная выходная мощность^д – Фаза^е – Центральная частота – Ширина полосы частот – Побочное излучение	Регулировка или замена
Приемник	– Усиление МШУ^г – Фаза^г – Общее усиление приемника^h	Регулировка или замена
Компьютер	– Очистка – Состояние компонентов во время работы – Корректирующие файлы безопасности программного обеспечения^и	Регулировка или замена
Метеорологическая будка	– Кондиционирование воздуха – Уплотнения дверей, окон и отверстий^j – Батарея ИБП	Очистка, замена или ремонт

^а Например, обтекатель антенны радиолокатора, ограждение для уменьшения помех и интерференции (т.е. экранирующее ограждение) и установленные снаружи устройства для обеспечения электроснабжения, передачи, приема, распределения сигналов, а также управления и мониторинга системы.

^б Рекомендуется регулярная замена.

^с S21 измеряется, когда его измерение возможно и запрашивается пользователем.

^д Пиковая выходная мощность измеряется на выходе оконечного усилителя или на более позднем этапе и рассчитывается по значению V_{pp} , измеренному осциллографом (см. рисунок 5.А.12). Пиковую выходную мощность также можно измерить с помощью измерителя пиковой мощности. При использовании нескольких оконечных усилителей (например, используется антенна с фазированной решеткой и/или выходы нескольких оконечных усилителей синтезируются для увеличения выходной мощности), измерения проводятся для каждого оконечного усилителя.

^е Выполняется при использовании нескольких оконечных усилителей.

^г При использовании антенны с фазированной решеткой или нескольких антенн измерения проводятся для каждого МШУ.

^г Выполняется при использовании антенны с фазированной решеткой.

^h Суммарное усиление приемника определяется между входом МШУ и входом АЦП.

^и Корректирующие файлы безопасности программного обеспечения применяются в соответствии с политикой информационной безопасности и на основе обсуждения между пользователем и поставщиком (см. 11.7).

^j В случае работы без персонала следует проверить будку на предмет попадания объектов извне.

- измеритель мощности или измеритель пиковой мощности;
- аттенюатор для измерения передаваемой мощности;
- разъемы, кабели и другие предметы, необходимые для сигнального соединения.

Необходимо регулярно проверять точность измерительных приборов, используемых при техническом обслуживании, путем калибровки с сертификацией или другими способами.

11.6 **Политика в отношении запасных частей**

Если РПВ непрерывно эксплуатируется для предоставления метеорологической информации, необходимо иметь в наличии запасные части для быстрого устранения неисправностей. Запасные части должны подбираться на основе обсуждения между пользователем и поставщиком. Следует иметь в наличии необходимые запасные части, чтобы исключить возможность остановки производства основных деталей РПВ.

11.7 **Программное обеспечение**

Атаки вирусов и вредоносных программ представляют собой опасную угрозу для компьютеров, используемых при эксплуатации РПВ. Для предотвращения незаконного доступа к компьютерам, а также установки и исполнения на них вредоносных программ, пользователь должен применять эффективную политику в области информационной безопасности для работы РПВ. Проектирование, эксплуатация и техническое обслуживание коммуникационной сети и компьютерной системы (то есть аппаратного обеспечения, операционной системы и программного обеспечения) должны осуществляться в соответствии с политикой в области информационной безопасности и на основе обсуждения между пользователем и поставщиком.

ДОБАВЛЕНИЕ А. ПРИМЕР ПАРАМЕТРОВ, КОТОРЫЕ МОГУТ НАСТРАИВАТЬСЯ ОПЕРАТОРОМ

(Для информации)

В таблице А.1 и таблице А.2 перечислены параметры, которые могут настраиваться оператором при передаче импульсов и при передаче НВЧМ, соответственно.

Таблица А.1. Параметры, настраиваемые при передаче импульсов

<i>N^a</i>	<i>Параметр</i>	<i>Обозначение^a</i>	<i>Единица^b</i>	<i>Примечание</i>
1	Количество направлений лучей антенны ^c	N_{beam}	–	
2	Азимутальные углы лучей антенны ^c	$AZ [i]$	рад	$i = 1, 2, \dots, N_{\text{beam}}$
3	Зенитные углы лучей антенны ^c	$ZE [i]$	рад	
4	Интервал между импульсами Частота повторения импульсов	T_{IPP} f_{PRF}	с Гц	Эти два параметра взаимозаменяемы
5	Характеристики передаваемого импульса ^d			
5-1	Общая ширина импульса	τ_{tx}	с	
5-2	Количество субимпульсов	N_{subp}	–	
5-3	Ширина субимпульса	τ_{subp}	с	
5-4	Количество последовательностей импульсов	N_{pseq}	–	
5-5	Схема модуляции импульсных последовательностей	$C_p [i]$	–	$i = 1, 2, \dots, N_{\text{pseq}}$
5-6	Количество передаваемых частот	N_{freq}	–	
5-7	Передаваемые частоты	$f_{\text{RF}} [i]$	Гц	$i = 1, 2, \dots, N_{\text{freq}}$
6	Количество каналов приемника ^e	N_{ch}	–	
7	Начальный облучаемый диапазон	r_{start}	м	
8	Интервал дискретизации в диапазоне ^f Интервал дискретизации во времени ^f	Δr_{sample} Δt_{sample}	м с	Эти два параметра взаимозаменяемы
9	Количество стробов дальности	N_{range}	–	
10	Количество когерентных интегрирований ^g	N_{coh}	–	
11	Количество элементов во временных рядах I и Q после когерентного интегрирования ^h	N_{data}	–	
12	Количество некогерентных интегрирований ^c	N_{incoh}	–	

^a В документах, составленных поставщиком, могут использоваться другие символы.

^b Для облегчения понимания при отображении, вводе и записи параметров могут использоваться единицы, отличные от указанных в этой таблице (например, мкс, кГц, градусы).

^c Их не нужно определять при использовании метода РА.

^d τ_{tx} определяется как общая длительность передачи, в которой участвуют все субимпульсы. Определение τ_{tx} и τ_{subp} должно быть четко показано. В ФИД используется несколько частот.

^e Необходимо определить N_{ch} , если используется многоканальный прием.

^f Δr_{sample} (Δt_{sample}) может быть меньше разрешения по дальности, если используется сверхдискретизация (см. 7.1.1 и 7.2).

^g N_{coh} может быть определено как число, включая N_{pseq} , или как число, не включающее N_{pseq} . Необходимо четко показать определение N_{coh} . В данном приложении N_{coh} определяется как число, не включающее N_{pseq} .

^h При использовании метода ДКЛ это также обозначает количество элементов в доплеровском спектре.

Таблица А.2. Параметры, настраиваемые при передаче НВЧМ

№	Параметр	Обозначение ^a	Единица ^b	Примечание
1	Количество направлений лучей антенны ^c	N_{beam}	–	
2	Азимутальные углы лучей антенны ^c	$AZ [i]$	рад	$i = 1, 2, \dots, N_{\text{beam}}$
3	Зенитные углы лучей антенны ^c	$ZE [i]$	рад	
4	Интервал между импульсами Частота повторения импульсов	T_{IPP} f_{PRF}	с Гц	Эти два параметра взаимозаменяемы
5	Характеристики передачи и приема НВЧМ ^d			
5-1	Начальная частота	f_{st}	Гц	
5-2	Конечная частота	f_{end}	Гц	
5-3	Длительность передачи	T_{tx}	с	
5-4	Скорость качания частоты	Δf	Гц·с ⁻¹	$\Delta f = \frac{f_{\text{end}} - f_{\text{st}}}{T_{\text{tx}}}$
5-5	Время начала замера	t_{start}	с	
5-6	Интервал дискретизации	Δt_{sample}	с	
5-7	Количество элементов дискретизации	N_{sample}	–	
6	Количество каналов приемника ^f	N_{ch}	–	
7	Количество стробов дальности ^g	N_{range}	–	
8	Количество когерентных интегрирований ^h	N_{coh}	–	
9	Количество элементов во временных рядах I и Q после когерентного интегрирования ⁱ	N_{data}	–	
10	Количество некогерентных интегрирований ^c	N_{incoh}	–	

^a В документах, составленных поставщиком, могут использоваться другие символы.

^b Для облегчения понимания при отображении, вводе и записи параметров могут использоваться единицы, отличные от указанных в этой таблице (например, мкс, кГц, градусы).

^c Их не нужно определять при использовании метода РА.

^d Показан случай линейной модуляции частоты. Можно использовать как линейную, так и нелинейную модуляцию несущей частоты. При нелинейной модуляции частоты информация, необходимая для настройки характеристик передачи и приема НВЧМ, должна быть предоставлена поставщиком.

^e Определяется как разница во времени между началом передачи и началом замера.

^f Необходимо определить N_{ch} , если используется многоканальный прием.

^g Могут быть отброшены сигналы в лишних частотных элементах, которые получены путем демодуляции полученных сигналов (т.е. преобразования в частотной области для определения диапазона полученных сигналов) и, следовательно, не соответствуют реальному диапазону. Также могут быть отброшены сигналы, полученные на больших расстояниях и, следовательно, редко содержащие значительный эхосигнал. В таких случаях необходимо описать разницу между N_{sample} и N_{range} в документах и/или других материалах, поясняющих принцип работы и формат данных РПВ.

^h N_{coh} может быть определено как число, включающее N_{pseq} , или как число, не включающее N_{pseq} . Необходимо четко показать определение N_{coh} . В данном приложении N_{coh} определяется как число, не включающее N_{pseq} .

ⁱ При использовании метода ДКЛ это также обозначает количество элементов в доплеровском спектре.

ДОБАВЛЕНИЕ В. ОБЩЕЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РАДИОЛОКАЦИОННОГО УРАВНЕНИЯ ДЛЯ МОНОСТАТИЧЕСКОГО РАДАРА

(Для информации)

Общая форма радиолокационного уравнения для моностатического радара выражается следующим образом:

$$\overline{P(r_0)} = \int_0^{r_2} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi (r) I(r_0, r) dV \quad (B.1)$$

где:

r_0 — вектор исходного положения ($r_0 \sin \theta_0 \sin \phi_0, r_0 \sin \theta_0 \cos \phi_0, r_0 \cos \theta_0$). r_0 — дальность до радара. θ_0 и ϕ_0 — зенитный и азимутальный углы исходного положения, соответственно;

r — вектор, равный ($r \sin \theta \sin \phi, r \sin \theta \cos \phi, r \cos \theta$). r — дальность до радара, θ — зенитный угол и ϕ — азимутальный угол;

$\overline{P(r_0)}$ — принимаемая мощность в r_0 ;

$\eta(r)$ — отражательная способность объема в r ;

r_2 — максимальная дальность, достигаемая передаваемым импульсом.

dV в формуле (B.1) определяется следующим образом:

$$dV = r^2 dr \sin \theta, d\theta, d\phi \quad (B.2)$$

I в формуле (B.1) определяется следующим образом:

$$I(r_0, r) = \frac{C f^4 (\theta - \theta_0, \phi - \phi_0) |W_s(r_0, r)|^2}{l^2(r) r^4} \quad (B.3)$$

$$C = \frac{P_t g^2 \lambda^2}{(4\pi)^3} \quad (B.4)$$

где:

$f^2(\theta, \phi)$ — нормированная односторонняя мощность диаграммы направленности излучения антенны (т.е. $f^2(0,0) = 1$ в (θ_0, ϕ_0));

$W_s(r_0, r)$ — функция взвешивания по дальности;

$l(r)$ — потери на затухание в r из-за атмосферных газов и гидрометеоров;

P_t — пиковая мощность, передаваемая от антенны;

g — усиление мощности антенны;

λ — длина волны радиолокатора;

C — константа, определяемая P_t, g и λ .

Более подробная информация об общем представлении радиолокационного уравнения для моностатического радара представлена в разделе 4.4 источника [2].

ДОБАВЛЕНИЕ С. ОТРАЖАТЕЛЬНАЯ СПОСОБНОСТЬ ЭХОСИГНАЛА ОСАДКОВ

(Для информации)

Когда для рассеяния радиоволн гидрометеорами можно применить аппроксимацию Рэлея, отношение между отражательной способностью η и рассеянием гидрометеорами выражается следующим образом:

$$\eta = \frac{\pi^5}{\lambda^4} |K_m|^2 Z \quad (\text{C.1})$$

где:

Z — коэффициент отражения радара;

λ — длина волны радиолокатора;

K_m — коэффициент, определяемый типом гидрометеора.

K_m выражается следующим образом:

$$K_m = \frac{(m^2 - 1)}{(m^2 + 2)} \quad (\text{C.2})$$

где m — комплексный показатель преломления гидрометеора.

Z задается уравнением:

$$Z = \int_0^\infty N(D) D^6 dD \quad (\text{C.3})$$

где:

D — диаметр гидрометеора;

$N(D)$ — распределение размеров гидрометеоров.

Подробная информация о η и Z приводится в разделах 3.2 и 4.4.5 источника [2].

ДОБАВЛЕНИЕ D. ВЛИЯНИЕ АССИМИЛЯЦИИ ПРОДУКЦИИ О ВЕТРЕ, ПОЛУЧЕННОЙ С ПОМОЩЬЮ РПВ, В АТМОСФЕРНЫХ МОДЕЛЯХ

(Для информации)

При ассимиляции продукции о ветре, полученной с помощью оперативных РПВ, в атмосферных моделях можно оценить влияние такой ассимиляции. Существуют исследования, дающие оценку влияния ассимиляции продукции о ветре в атмосферных моделях^[56;64;65;66;67].

ДОБАВЛЕНИЕ Е. УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ СИСТЕМЫ WINDAS (СЕТЬ ПРОФИЛОМЕТРОВ ВЕТРА И СИСТЕМА СБОРА ДАННЫХ) ЯПОНСКОГО МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО АГЕНТСТВА

(Для информации)

Японское метеорологическое агентство обеспечивает управление качеством в отношении данных наблюдений WINDAS, как показано в таблице Е.1. Автоматическая обработка выполняется как на станциях наблюдения, так и на центральном сервере обработки, в то время как операторы в штаб-квартире отвечают за окончательную проверку данных^[68].

Таблица Е.1. Элементы управления качеством и соответствующие им задачи

Элементы	Задачи
Эхосигнал от птиц	Устранение отраженных или рассеянных эхосигналов, главным образом из-за перелетных птиц
Эхосигнал от земной поверхности	Устранение отраженного или рассеянного эхосигнала от гор или искусственных сооружений, таких как здания
Ширина спектра ^a	Оценка ширины спектра
Однородность поля ветра	Проверка сбалансированности между различными лучами радиолокатора (антенны) в пяти направлениях
Консенсусное усреднение	Подтверждение среднего значения за 10 минут на основе 1-минутного значения
Аппроксимация поверхности второго порядка	Проверка на отклонение от аппроксимированных значений компонентов ветра по трехмерным поверхностям второго порядка
Вертикальный сдвиг ветра	Подтверждение разности ветров между двумя соседними слоями
Ручной менеджмент качества	Окончательная проверка операторами

^a В источнике [68] используется термин «спектральная ширина» вместо термина «ширина спектра», используемого в настоящем приложении.

ДОБАВЛЕНИЕ F. ПРИМЕР УРОВНЕЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ, ПОМИМО ТЕХ ДАННЫХ, КОТОРЫЕ ОБЫЧНО ИСПОЛЬЗУЮТСЯ КОНЕЧНЫМИ ПОЛЬЗОВАТЕЛЯМИ

(Для информации)

В этом добавлении описан пример уровней обработки для данных, помимо используемых конечными пользователями. Полученные сигналы, собранные и обработанные РПВ, классифицируются по уровням 0a, 0b, 0c, 1 и 2. Эти уровни данных имеют следующие определения:

Уровень 0a: Комплексные (I и Q) временные ряды после когерентного интегрирования. Политика хранения данных Уровня 0a должна определяться на основе обсуждения между пользователем и поставщиком.

Уровень 0b: Доплеровские спектры мощности или автокорреляции и кросс-корреляции. При использовании метода ДКЛ сохраняются доплеровские спектры мощности. При использовании метода РА сохраняются автокорреляции и кросс-корреляции. Доплеровские спектры мощности на Уровне 0b отличаются от временных рядов I и Q на Уровне 0a тем, что доплеровские спектры мощности на Уровне 0b не содержат информации о фазе. Политика хранения данных Уровня 0b должна определяться на основе обсуждения между пользователем и поставщиком.

Уровень 0c: Доплеровские спектры мощности после некогерентного интегрирования. Политика хранения данных Уровня 0c должна определяться на основе обсуждения между пользователем и поставщиком.

Уровень 1: То же, что и уровень 1, описанный в разделе [9.1](#).

Уровень 2: То же, что и уровень 2, описанный в разделе [9.1](#).

Каждый уровень данных может быть дополнительно классифицирован на основе КК в ходе цифровой обработки сигналов. Данные без КК (или до проведения КК) классифицируются как данные Уровня А. Данные после проведения КК классифицируются на Уровне В. Например, векторы ветра после проведения КК классифицируются на Уровне 2В. Комплексные временные ряды без КК классифицируются на Уровне 0aА.

ДОБАВЛЕНИЕ G. ФОРМАТ ДАННЫХ ДЛЯ ПРОФИЛОМЕТРА ВЕТРА ЯПОНСКОГО МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО АГЕНТСТВА (ЯМА) С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ BUFR4

(Для информации)

Таблица G.1. Перечень участков

Сообщение	Участки
IUPC41	47406 47417 47423
IUPC42	47585 47587 47590 47570
IUPC43	47626 47629 47674
IUPC44	47612 47640 47656
IUPC45	47636 47663 47616
IUPC46	47755 47891 47893 47898
IUPC47	47819 47815 47822
IUPC48	47800 47805 47836 47912
IUPC49	47678 47795 47746
IUPC50	47848 47909 47945

Таблица G.2. Формат данных для профилометра ветра ЯМА (с использованием BUFR4)

Заголовок	IUPC [41-50] (проб) RJTD (проб) ДДчмм			Пример вывода
	Номер октета	Номер бита		
РАЗДЕЛ 0 (Раздел указателя)	1 to 4	32	“BUFR”	42 55 46 52
	5 to 7	24	Общая длина сообщения BUFR	xx xx xx
	8	8	Номер издания BUFR (4)	04
РАЗДЕЛ 1 (Раздел идентификации)	1 to 3	24	Длина раздела (22)	00 00 16
	4	8	Эталонная таблица для кода BUFR (нуль, если используются таблицы BMO FM 94 BUFR)	00
	5, 6	16	Идентификатор центра-поставщика/производителя (Токио = 34)	00 22
	7, 8	16	Идентификатор подцентра-поставщика/производителя (0)	00 00
	9	8	Последовательный номер обновления	xx
	10	8	Необязательного раздела нет (бит 1 = 0)	00
	11	8	Категория данных (2)	02
	12	8	Международная подкатегория данных (10)	0A
	13	8	Локальная подкатегория данных (0)	00
	14	8	Номер варианта используемой главной таблицы (12)	0C
	15	8	Номер версии локальных таблиц, применяемых для расширения используемых эталонных таблиц (1)	01
	16, 17	16	Год	xx xx
	18	8	Месяц	xx
	19	8	День	xx
	20	8	Час	xx
	21	8	Минута	xx
	22	8	Секунда	xx

Заголовок	IUPC [41-50] (проб) RJTD (проб) ДДчмм			Пример вывода
	Номер октета	Номер бита		
РАЗДЕЛ 3 (Раздел описания данных)	1 to 3	24	Длина раздела (обычно 55)	00 00 37
	4	8	Установлены на нуль (зарезервированы)	00
	5, 6	16	Количество поднаборов данных	00 xx
	7	8	Наблюдаемые данные, данные без сжатия = 10000000	80
	8, 9	16	Номер блока ВМО (0-01-001)	01 01
	10, 11	16	Номер станции ВМО (0-01-002)	01 02
	12, 13	16	Широта (низкая точность) (0-05-002)	05 02
	14, 15	16	Долгота (низкая точность) (0-06-002)	06 02
	16, 17	16	Высота станции (0-07-001)	07 01
	18, 19	16	Тип используемого измерительного оборудования (0-02-003)	02 03
	20, 21	16	Повторение с задержкой 16 дескрипторов (0-16-000)	50 00
	22, 23	16	Коэффициент повторения дескриптора с задержкой (0-31-001)	1F 01
	24, 25	16	Год (0-04-001)	04 01
	26, 27	16	Месяц (0-04-002)	04 02
	28, 29	16	День (0-04-003)	04 03
	30, 31	16	Час (0-04-004)	04 04
	32, 33	16	Минута (0-04-005)	04 05
	34, 35	16	Значимость времени (0-08-021)	08 15
	36, 37	16	Временной период или отклонение (0-04-025)	04 19
	38, 39	16	Повторение с задержкой 7 дескрипторов (1-07-000)	47 00
	40, 41	16	Коэффициент повторения дескриптора с задержкой (0-31-001)	1F 01
	42, 43	16	Высота над станцией (0-07-006)	07 06

Заголовок	IUPC [41-50] (проб) RJTD (проб) ДДчмм			Пример вывода
	Номер октета	Номер бита		
РАЗДЕЛ 3 (Раздел описания данных) (продолжение)	44, 45	16	Обозначить длину данных для непосредственно следующего локального дескриптора (2-06-008)	86 08
	46, 47	16	Информация о качестве (прилагаемая таблица) (0-25-192)	19 C0
	48, 49	16	Компонента u (0-11-003)	0B 03
	50, 51	16	Компонента v (0-11-004)	0B 04
	52, 53	16	Компонента w (0-11-006)	0B 06
	54, 55	16	Отношение сигнал-шум (0-21-030)	15 1E
РАЗДЕЛ 4 (Раздел данных)	1 to 3	24	Длина раздела данных (октеты)	xx xx xx
	4	8	Установлены на нуль (зарезервированы)	00
	5	7	Номер блока ВМО	
		10	Номер станции ВМО	
		15	Широта (низкая точность)	
		16	Долгота (низкая точность)	
		15	Высота станции (м)	
		4	Тип используемого измерительного оборудования (6)	
		8	Коэффициент повторения дескриптора с задержкой (X)	
		12	Год	
		4	Месяц	

IUPC [41-50] (проб) RJTD (проб) ДДчмм			
Заголовок	Номер октета	Номер бита	Пример вывода
РАЗДЕЛ 4 (Раздел данных) (продолжение)		6	День
		5	Час
		6	Минута
		5	Значимость времени
		12	Временной период или отклонение
		8	Коэффициент повторения дескриптора с задержкой (Y)
		15	Высота (м)
		8	Информация о качестве
		13	Компонента u (0,1 м·с ⁻¹)
		13	Компонента v (0,1 м·с ⁻¹)
		13	Компонента w (0,01 м·с ⁻¹)
		8	Отношение сигнал-шум (дБ)
		?	Добавление битов, установленных на нуль, к целому числу битов, кратному 8, в этом разделе
РАЗДЕЛЫ (Конечный раздел)	1 to 4	32	7777
			37 37 37 37

Таблица G.3. 0-25-192 Информация о качестве (прилагаемая таблица)

Идентификатор флага	Двоичное отображение	Определение
0	10000000	Точные данные
1	01000000	Сомнительные данные (проверка аппроксимации поверхности второго порядка)
2	00100000	Сомнительные данные (проверка на вертикальный сдвиг)
3	00010000	Сомнительные данные (проверка пространственного сопоставления с близлежащими участками)
4	00001000	Сомнительные данные (проверка на недостаточность данных)
5	00000100	Сомнительные данные (недостаточное количество выборок для проверки аппроксимации поверхности второго порядка)
6	00000010	Сомнительные данные (другие проверки, шумы от птиц, самолетов, помехи от земной/морской поверхности и т. д.)
7	11111111	Отсутствующее значение

В настоящее время в системе обработки ЯМА не используются идентификаторы флагов 3, 4 и 5.

Она не проверяет идентификатор 3 (пространственное сопоставление с близлежащими участками).

В случае идентификаторов 4 или 5 они будут установлены на идентификатор 7 (отсутствующее значение).

ДОБАВЛЕНИЕ Н. ФОРМАТ ДАННЫХ ДЛЯ ВЕТРОВОГО ПРОФИЛОМЕТРА МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКАЯ СЛУЖБА ГЕРМАНИИ (МСГ) С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ NETCDF4

(Для информации)

NetCDF (Network Common Data Form — общий сетевой формат данных) — это машинезависимый, самоописывающийся стандарт двоичного формата данных, разработанный с целью обеспечения независимого от платформы хранения самоописывающихся данных с тем, чтобы пользователи могли получать к ним доступ и понимать их без необходимости использования внешних ресурсов. Он особенно хорошо подходит для обмена научными данными.

Формат находится под управлением программы Unidata при Корпорации университетов для исследований атмосферы (ЮКАР). Благодаря высокой гибкости формата появилось несколько условных обозначений, призванных обеспечить удобный обмен данными. Одним из примеров служат условные обозначения, принятые для Климата и Прогнозов (КП), см. <https://cfconventions.org/>. Данные РПВ МСГ соответствуют условным обозначениям, приведенным в версии КП 1.8.

Глобальные атрибуты, содержащиеся в заголовке файла NetCDF для всех данных:

Атрибут	Значение
title	данные радиолокационного ветрового профилометра
institution	Метеорологическая служба Германии
site_location	Линденберг
wigos_station_id	0-20000-0-10394
wmo_id	10394
instrument_contact	info@dwd.de
instrument_id	LINWP
instrument_type	LAP-16000
instrument_mode	стандартный высший низший
instrument_serial_number	482XM0003
history	создано 2021-04-29 в 15:30
instrument_firmware_version	LAP-XM 2.7.1.1
source	наземное дистанционное зондирование
references	описание формата данных Е-профиль
conventions	CF 1.8
comments	различная информация о наборе данных
data policy	неограниченное использование
data_blocking_status	не определено истина ложь

Переменные для данных Уровня 0 и Уровня 1

Название	Тип	Измерение	Стандартное имя	Полное название	Единицы измерения	Комментарии
config	строка	1	configuration file			Файл содержит полную конфигурацию радара
lon	32-битное действительное	1	longitude		degrees_east	
lat	32-битное действительное	1	latitude		degrees_north	
zsl	32-битное действительное	1	altitude	Высота датчика над средним уровнем моря	м	
firstgate	32-битное действительное	1		первый строб	нс	Время в нс для достижения первого строба по дальности
flip	32-битное действительное	1		режим транспонирования	1	
gatespacing	32-битное действительное	1		распределение стробов	нс	Время в нс между стробами дальности
ipp	32-битное действительное	1		интервал между импульсами	нс	Время в нс между импульсами передатчика
nci	32-битное действительное	1		количество когерентных интегрирований	1	
ncode	32-битное действительное	1		количество кодовых битов	1	Количество кодовых битов в импульсе (сжатие импульса)
nhts	32-битное действительное	1		количество стробов дальности	1	
npts	32-битное действительное	1		количество точек	1	Количество точек в доплеровском спектре
nrx	32-битное действительное	1		количество приёмников	1	
nspec	32-битное действительное	1		количество спектральных средних	1	Количество одиночных спектров, используемых в спектральном усреднении
pw	32-битное действительное	1		ширина импульса	нс	Время передаваемого импульса в нс
verticalcorrect	32-битное действительное	1		вертикальная коррекция	1	1 = включено 0 = отключено

Название	Тип	Измерение	Стандартное имя	Полное название	Единицы измерения	Комментарии
windbeginpoint	32-битное действительное	1		начальная точка ветра	1	Начальная точка в спектре (БПФ) данных о ветре
windnumpoints	32-битное действительное	1		количество точек ветра	1	Количество точек спектра (БПФ) в данных о ветре
radarfreq	32-битное действительное	1		частота радара	Гц	Частота передаваемого импульса
nyquist	32-битное действительное	1		Частота Найквиста	м·с ⁻¹	Однозначный диапазон для доплеровского спектра в метрах в секунду
zenith	массив 32-битный действительный	1 [time]	zenith_angle	направление луча в зените	градус	Зенитный угол луча к местной вертикали; значение, равное нулю, находится непосредственно вверх
azi	массив 32-битный действительный	1 [time]	sensor_azimuth_angle	азимут датчика по отношению к ориентиру	градус	Азимутальный угол датчика — это горизонтальный угол между линией визирования от точки наблюдения до датчика и опорным направлением в точке наблюдения, которое часто является истинным севером. Угол измеряется по часовой стрелке, начиная с исходного направления.
height	массив 32-битный действительный	1 [height]	height		м	Расстояние по вертикали от датчика до центра строба дальности
height_bnds	массив 32-битный действительный	2 [height] ^[2]			м	
time	массив 64-битный действительный	1 [time]	time		число секунд с 1970-01-01 00:00:00	Временная метка в конце интервала усреднения
time_bnds	массив 64-битный действительный	2 [time] ^[2]			число секунд с 1970-01-01 00:00:00	
timeseries	массив 32-битный действительный	3 [time], [height], [timeseriespoints] _a		временной ряд	количество	Временные ряды данных I/Q

Название	Тип	Измерение	Стандартное имя	Полное название	Единицы измерения	Комментарии
spectra	массив 32-битный действительный	3 [time], [height], [spectrapoints] ^b		данные о спектрах	произв. ед.	Доплеровские спектры
velocity	Сетка	2 [time], [height]		скорость	м·с ⁻¹	Расчетный момент первого порядка
width	Сетка	2 [time], [height]		длина	м·с ⁻¹	Расчетный момент второго порядка
power	Сетка	2 [time], [height]		мощность	дБ	Расчетный момент нулевого порядка
snr	Сетка	2 [time], [height]		ОСШ	дБ	
noise	Сетка	2 [time], [height]		шум	дБ	Уровень шума
^a timeseriespoints равно npts.						
^b spectrapoints равно npts.						

Переменные для данных Уровня 2

Название	Тип	Измерение	Стандартное имя	Полное название	Единицы измерения	Комментарии
config	строка	1	configuration file			
frequency	32-битное действительное	1		instrument_frequency	Гц	Рабочая частота РПВ
lon	32-битное действительное	1	longitude		degrees_east	
lat	32-битное действительное	1	latitude		degrees_north	
zsl	32-битное действительное	1	altitude	высота датчика над средним уровнем моря	м	
				азимут датчика по отношению к ориентиру	градус	Sensor_azimuth_angle — это горизонтальный угол между линией визирования от точки наблюдения до датчика и опорным направлением в точке наблюдения, которое часто определяется по отношению к северу. Угол измеряется по часовой стрелке, начиная с исходного направления.
vert_res	32-битное действительное	1		vertical_resolution_measurement	м	Рассчитывается по ширине импульса и углу дальности луча

Название	Тип	Измерение	Стандартное имя	Полное название	Единицы измерения	Комментарии
hor_swidht	массив 32-битный действительный	1 [height]		horizontal_sample_width	м	Рассчитывается по углу дальности и высоте луча
height	массив 32-битный действительный	1 [height]	height		м	Расстояние по вертикали от датчика до центра строба дальности
height_bnds	массив 32-битный действительный	2 [height] ^[2]			м	
time	массив 64-битный действительный	1 [time]	time		число секунд с 1970-01-01 00:00:00	Временная метка в конце интервала усреднения
time_bnds	массив 64-битный действительный	2 [time][2]			число секунд с 1970-01-01 00:00:00	
wspeed	сетка	2 [time], [height]	wind_speed		м·с ⁻¹	Скалярная скорость ветра (величина вектора)
wdir	сетка	2 [time], [height]	wind_from_direction		градус	Направление ветра
u	сетка	2 [time], [height]	eastward_wind		м·с ⁻¹	«На восток» указывает на компоненту вектора, которая положительна при направлении на восток (отрицательна при направлении на запад). Ветер определяется как двумерный (горизонтальный) вектор скорости воздуха, не имеющий вертикальной компоненты.
v	сетка	2 [time], [height]	northward_wind		м·с ⁻¹	«На север» указывает на компоненту вектора, которая положительна при направлении на север (отрицательна при направлении на юг). Ветер определяется как двумерный (горизонтальный) вектор скорости воздуха, не имеющий вертикальной компоненты.
w	сетка	2 [time], [height]	upward_air_velocity		м·с ⁻¹	Вертикальная компонента ветра, положительная при направлении вверх (отрицательная при направлении вниз)
qwind	сетка	2 [time], [height]		wind_quality_flag		Показатель качества от 0 до 9 (0 = действительный, 7 = сомнительный, 8 = недействительный, 9 = отсутствует)

Название	Тип	Измерение	Стандартное имя	Полное название	Единицы измерения	Комментарии
qu	сетка	2 [time], [height]		quality_flag_u		Показатель качества от 0 до 9 (0 = действительный, 7 = сомнительный, 8 = недействительный, 9 = отсутствует)
qv	сетка	2 [time], [height]		quality_flag_v		Показатель качества от 0 до 9 (0 = действительный, 7 = сомнительный, 8 = недействительный, 9 = отсутствует)
qw	сетка	2 [time], [height]		quality_flag_w		Показатель качества от 0 до 9 (0 = действительный, 7 = сомнительный, 8 = недействительный, 9 = отсутствует)
nvrad	сетка	2 [time], [height]		количество радиальных скоростей	1	Количество (усредненных) радиальных скоростей, используемых для расчета ветра

БИБЛИОГРАФИЯ

- [1] Fukao, S.; Hamazu, K. *Radar for Meteorological and Atmospheric Observations*; Springer Japan: Tokyo, 2014. <https://doi.org/10.1007/978-4-431-54334-3>.
- [2] Doviak, R. J.; Zrnić, D. S. *Doppler Radar and Weather Observations*, second ed.; Dover Publications: New York, 2006.
- [3] Hocking, W. K.; Röttger, J.; Palmer, R. D. et al. *Atmospheric Radar: Application and Science of MST Radars in the Earth's Mesosphere, Stratosphere, Troposphere, and Weakly Ionized Regions*; Cambridge University Press: Cambridge, UK, 2016. <https://doi.org/10.1017/9781316556115>.
- [4] Nastrom, G. D. Doppler Radar Spectral Width Broadening Due to Beamwidth and Wind Shear. *Annales Geophysicae* **1997**, 15 (6), 786–796. <https://doi.org/10.1007/s00585-997-0786-7>.
- [5] Yamamoto, M.; Sato, T.; May, P. T. et al. Estimation Error of Spectral Parameters of Mesosphere-Stratosphere-Troposphere Radars Obtained by Least Squares Fitting Method and Its Lower Bound. *Radio Science* **1988**, 23 (6), 1013–1021. <https://doi.org/10.1029/RS023i006p01013>.
- [6] Le Vine, D. M. Review of Measurements of the RF Spectrum of Radiation from Lightning. *Meteorology and Atmospheric Physics* **1987**, 37 (3), 195–204. <https://doi.org/10.1007/BF01042441>.
- [7] Päsche, E.; Leinweber, R.; Lehmann, V. An Assessment of the Performance of a 1.5 μm Doppler Lidar for Operational Vertical Wind Profiling Based on a 1-Year Trial. *Atmospheric Measurement Techniques* **2015**, 8 (6), 2251–2266. <https://doi.org/10.5194/amt-8-2251-2015>.
- [8] Briggs, B. H. The Analysis of Spaced Sensor Records by Correlation Techniques. In *Handbook for MAP*, Volume 13; Vincent, R. A., Ed.; ICSU Scientific Committee on Solar-Terrestrial Physics: Urbana, USA, 1984; 166–186.
- [9] International Telecommunication Union (ITU). Resolution 217 (WRC-97), in *Radio Regulations*, edition of 1998, Volume 3; ITU: Geneva, 1998, 186–187.
- [10] International Telecommunication Union (ITU). *Final Acts of the World Radiocommunication Conference (WRC-97)*. ITU: Geneva, 1997.
- [11] Schmidt, G.; Ruster, R.; Czechowsky, P. Complementary Code and Digital Filtering for Detection of Weak VHF Radar Signals from the Mesosphere. *IEEE Transactions on Geoscience Electronics* **1979**, 17 (4), 154–161. <https://doi.org/10.1109/TGE.1979.294643>.
- [12] Strauch, R. G.; Merritt, D. A.; Moran, K. P. et al. The Colorado Wind-Profiling Network. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* **1984**, 1 (1), 37–49. [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(1984\)001<0037:TCWPN>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(1984)001<0037:TCWPN>2.0.CO;2).
- [13] Sato, T.; Woodman, R. F. Spectral Parameter Estimation of CAT Radar Echoes in the Presence of Fading Clutter. *Radio Science* **1982**, 17 (4), 817–826. <https://doi.org/10.1029/RS017i004p00817>.
- [14] Woodman, R. F. Spectral Moment Estimation in MST Radars. *Radio Science* **1985**, 20 (6), 1185–1195. <https://doi.org/10.1029/RS020i006p01185>.
- [15] Hildebrand, P. H.; Sekhon, R. S. Objective Determination of the Noise Level in Doppler Spectra. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* **1974**, 13 (7), 808–811. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1974\)013<0808:ODOTNL>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1974)013<0808:ODOTNL>2.0.CO;2).
- [16] Gan, T.; Yamamoto, M. K.; Hashiguchi, H. et al. Error Estimation of Spectral Parameters for High-Resolution Wind and Turbulence Measurements by Wind Profiler Radars. *Radio Science* **2014**, 49 (12), 1214–1231. <https://doi.org/10.1002/2013RS005369>.
- [17] Skolnik, M. I. *Radar Handbook*, third ed.; McGraw-Hill, 2008.
- [18] Spano, E.; Ghebrehbrhan, O. Complementary Sequences with High Sidelobe Suppression Factors for ST/MST Radar Applications. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* **1996**, 34 (2), 317–329. <https://doi.org/10.1109/36.485110>.
- [19] Spano, E.; Ghebrehbrhan, O. Sequences of Complementary Codes for the Optimum Decoding of Truncated Ranges and High Sidelobe Suppression Factors for ST/MST Radar Systems. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* **1996**, 34 (2), 330–345. <https://doi.org/10.1109/36.485111>.
- [20] Skolnik, M. I. *Radar Handbook*; McGraw-Hill, 1970.
- [21] Capon, J. High-Resolution Frequency-Wavenumber Spectrum Analysis. *Proceedings of the IEEE* **1969**, 57 (8), 1408–1418. <https://doi.org/10.1109/PROC.1969.7278>.
- [22] Luce, H.; Yamamoto, M.; Fukao, S. et al. A Frequency Domain Radar Interferometric Imaging (FII) Technique Based on High-Resolution Methods. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* **2001**, 63 (2), 221–234. [https://doi.org/10.1016/S1364-6826\(00\)00147-4](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(00)00147-4).
- [23] Palmer, R. D.; Yu, T.-Y.; Chilson, P. B. Range Imaging Using Frequency Diversity. *Radio Science* **1999**, 34 (6), 1485–1496. <https://doi.org/10.1029/1999RS900089>.

- [24] Yamamoto, M. K. New Observations by Wind Profiling Radars. In *Doppler Radar Observations – Weather Radar, Wind Profiler, Ionospheric Radar, and Other Advanced Applications*; Bech, J.; Chau, J. L., Eds.; InTech: Rijeka, Croatia, 2012; 247–270.
- [25] Yamamoto, M. K.; Fujita, T.; Abdul Aziz, N. H. B. et al. Development of a Digital Receiver for Range Imaging Atmospheric Radar. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* **2014**, *118*, 35–44. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2013.08.023>.
- [26] Chilson, P. B.; Yu, T.-Y.; Strauch, R. G. et al. Implementation and Validation of Range Imaging on a UHF Radar Wind Profiler. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* **2003**, *20* (7), 987–996. [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(2003\)20<987:IAVORI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(2003)20<987:IAVORI>2.0.CO;2).
- [27] Yu, T.-Y.; Zhang, G.; Chalamalasetti, A. B. et al. Resolution Enhancement Technique Using Range Oversampling. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* **2006**, *23* (2), 228–240. <https://doi.org/10.1175/JTECH1841.1>.
- [28] Palmer, R. D.; Gopalam, S.; Yu, T.-Y. et al. Coherent Radar Imaging Using Capon's Method. *Radio Science* **1998**, *33* (6), 1585–1598. <https://doi.org/10.1029/98RS02200>.
- [29] Cheong, B. L.; Hoffman, M. W.; Palmer, R. D. et al. Phased-Array Design for Biological Clutter Rejection: Simulation and Experimental Validation. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* **2006**, *23* (4), 585–598. <https://doi.org/10.1175/JTECH1867.1>.
- [30] Cox, H.; Zeskind, R.; Owen, M. Robust Adaptive Beamforming. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing* **1987**, *35* (10), 1365–1376. <https://doi.org/10.1109/TASSP.1987.1165054>.
- [31] Kamio, K.; Nishimura, K.; Sato, T. Adaptive Sidelobe Control for Clutter Rejection of Atmospheric Radars. *Annales Geophysicae* **2004**, *22* (11), 4005–4012. <https://doi.org/10.5194/angeo-22-4005-2004>.
- [32] Nishimura, K.; Nakamura, T.; Sato, T. et al. Adaptive Beamforming Technique for Accurate Vertical Wind Measurements with Multichannel MST Radar. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* **2012**, *29* (12), 1769–1775. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-11-00211.1>.
- [33] Hashimoto, T.; Nishimura, K.; Tsutsumi, M. et al. Meteor Trail Echo Rejection in Atmospheric Phased Array Radars Using Adaptive Sidelobe Cancellation. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* **2014**, *31* (12), 2749–2757. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-14-00035.1>.
- [34] Hashiguchi, H.; Manjo, T.; Yamamoto, M. Development of Middle and Upper Atmosphere Radar Real-Time Processing System with Adaptive Clutter Rejection. *Radio Science* **2018**, *53* (1), 83–92. <https://doi.org/10.1002/2017RS006417>.
- [35] Applebaum, S. Adaptive Arrays. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* **1976**, *24* (5), 585–598. <https://doi.org/10.1109/TAP.1976.1141417>.
- [36] Hashimoto, T.; Nishimura, K.; Sato, T. Adaptive Sidelobe Cancellation Technique for Atmospheric Radars Containing Arrays with Nonuniform Gain. *IEICE Transactions on Communications* **2016**, *E99.B* (12), 2583–2591. <https://doi.org/10.1587/transcom.2016EBP3047>.
- [37] Yamamoto, M. K.; Kawamura, S.; Nishimura, K. Facility Implementation of Adaptive Clutter Suppression to an Existing Wind Profiler Radar: First Result. *IEICE Communications Express* **2017**, *6* (9), 513–518. <https://doi.org/10.1587/comex.2017XBL0075>.
- [38] Hashimoto, T.; Nishimura, K.; Tsutsumi, M. et al. A User Parameter-Free Diagonal-Loading Scheme for Clutter Rejection on Radar Wind Profilers. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* **2017**, *34* (5), 1139–1153. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-16-0058.1>.
- [39] Riddle, A. C.; Hartten, L. M.; Carter, D. A. et al. A Minimum Threshold for Wind Profiler Signal-to-Noise Ratios. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* **2012**, *29* (7), 889–895. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-11-00173.1>.
- [40] Gage, K. S.; Balsley, B. B. Doppler Radar Probing of the Clear Atmosphere. *Bulletin of the American Meteorological Society* **1978**, *59* (9), 1074–1094. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1978\)059<1074:DRPOTC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1978)059<1074:DRPOTC>2.0.CO;2).
- [41] Lottman, B. T.; Frehlich, R. G. Evaluation of Doppler Radar Velocity Estimators. *Radio Science* **1997**, *32* (2), 677–686. <https://doi.org/10.1029/96RS03329>.
- [42] Fischler, M. A.; Bolles, R. C. Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography. *Communications of the ACM* **1981**, *24* (6), 381–395. <https://doi.org/10.1145/358669.358692>.
- [43] Frehlich, R. G.; Yadlowsky, M. J. Performance of Mean-Frequency Estimators for Doppler Radar and Lidar. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* **1994**, *11* (5), 1217–1230. [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(1994\)011<1217:POMFEF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(1994)011<1217:POMFEF>2.0.CO;2).
- [44] Всемирная метеорологическая организация (ВМО). *Руководство по метеорологическим приборам и методам наблюдений* (ВМО-№ 8), том V – Обеспечение качества и менеджмент систем наблюдений. Женева, 2023 г.

- [45] Cohn, S. A.; Goodrich, R. K. Radar Wind Profiler Radial Velocity: A Comparison with Doppler Lidar. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* **2002**, 41 (12), 1277–1282. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2002\)041<1277:RWPRVA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2002)041<1277:RWPRVA>2.0.CO;2).
- [46] Weber, B. L.; Wuertz, D. B. Comparison of Rawinsonde and Wind Profiler Radar Measurements. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* **1990**, 7 (1), 157–174. [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(1990\)007<0157:CORAWP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(1990)007<0157:CORAWP>2.0.CO;2).
- [47] May, P. T. Comparison of Wind-Profiler and Radiosonde Measurements in the Tropics. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* **1993**, 10 (1), 122–127. [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(1993\)010<0122:COWPAR>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(1993)010<0122:COWPAR>2.0.CO;2).
- [48] Haeefe, A.; Ruffieux, D. Validation of the 1290 MHz Wind Profiler at Payerne, Switzerland, Using Radiosonde GPS Wind Measurements. *Meteorological Applications* **2015**, 22 (S1), 873–878. <https://doi.org/10.1002/met.1507>.
- [49] Lehmann, V.; Teschke, G. Advanced Intermittent Clutter Filtering for Radar Wind Profiler: Signal Separation through a Gabor Frame Expansion and Its Statistics. *Annales Geophysicae* **2008**, 26 (4), 759–783. <https://doi.org/10.5194/angeo-26-759-2008>.
- [50] Wilfong, T. L.; Merritt, D. A.; Lataitis, R. J. et al. Optimal Generation of Radar Wind Profiler Spectra. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* **1999**, 16 (6), 723–733. [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(1999\)016<0723:OGORWP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(1999)016<0723:OGORWP>2.0.CO;2).
- [51] Merritt, D. A. A Statistical Averaging Method for Wind Profiler Doppler Spectra. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* **1995**, 12 (5), 985–995. [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(1995\)012<0985:ASAMFW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(1995)012<0985:ASAMFW>2.0.CO;2).
- [52] Cornman, L. B.; Goodrich, R. K.; Morse, C. S. et al. A Fuzzy Logic Method for Improved Moment Estimation from Doppler Spectra. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* **1998**, 15 (6), 1287–1305. [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(1998\)015<1287:AFLMFI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(1998)015<1287:AFLMFI>2.0.CO;2).
- [53] Clothiaux, E. E.; Penc, R. S.; Thomson, D. W. et al. A First-Guess Feature-Based Algorithm for Estimating Wind Speed in Clear-Air Doppler Radar Spectra. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* **1994**, 11 (4), 888–908. [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(1994\)011<0888:AFGFBA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(1994)011<0888:AFGFBA>2.0.CO;2).
- [54] Griesser, T.; Richner, H. Multiple Peak Processing Algorithm for Identification of Atmospheric Signals in Doppler Radar Wind Profiler Spectra. *Meteorologische Zeitschrift* **1998**, 292–302. <https://doi.org/10.1127/metz/7/1998/292>.
- [55] Weber, B. L.; Wuertz, D. B.; Welsh, D. C. et al. Quality Controls for Profiler Measurements of Winds and RASS Temperatures. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* **1993**, 10 (4), 452–464. [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(1993\)010<0452:QCFPMO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(1993)010<0452:QCFPMO>2.0.CO;2).
- [56] Ishihara, M.; Kato, Y.; Abo, T. et al. Characteristics and Performance of the Operational Wind Profiler Network of the Japan Meteorological Agency. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II* **2006**, 84 (6), 1085–1096. <https://doi.org/10.2151/jmsj.84.1085>.
- [57] Всемирная метеорологическая организация (ВМО). *Технический регламент*, том I — Общие метеорологические стандарты и рекомендуемые практики. (ВМО-№ 49). Женева, 2019 г.
- [58] Всемирная метеорологическая организация (ВМО) 2010 г. *Руководство по Глобальной системе наблюдений* (ВМО-№ 488). Женева, 2010 г. (обновлено в 2017 г.).
- [59] Hashiguchi, H.; Fukao, S.; Moritani, Y. et al. A Lower Troposphere Radar: 1.3-GHz Active Phased-Array Type Wind Profiler with RASS. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II* **2004**, 82 (3), 915–931. <https://doi.org/10.2151/jmsj.2004.915>.
- [60] World Meteorological Organization (WMO). *Manual on Codes* (WMO-No. 306), Volume I.2 International Codes. Geneva, 2021.
- [61] Haeefe, A.; Turp, M.; Lehman V. *BUFR Specification for Active Ground Based Remote Sensing Profiler Data*. European Meteorological Services Network (EUMETNET): Brussels, 2013. https://old.wmo.int/extranet/pages/prog/www/ISS/Meetings/IPET-DRMM_Tokyo2013/Documents/IPETDRMM-I_Doc3-2_2_ANNEX.pdf.
- [62] Unidata. *Network Common Data Form (NetCDF)*. <https://www.unidata.ucar.edu/software/netcdf/>.
- [63] Всемирная метеорологическая организация (ВМО) 2019 г. *Стандарт метаданных ИГЧВ* (ВМО-№ 1192). Женева, 2019 г.
- World Meteorological Organization (WMO). *WIGOS Metadata Standard* (WMO-No. 1192). Geneva, 2019.
- [64] Bouttier, F. The Use of Profiler Data at ECMWF. *Meteorologische Zeitschrift* **2001**, 497–510. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2001/0010-0497>.
- [65] Benjamin, S. G.; Schwartz, B. E.; Szoke, E. J. et al. The Value of Wind Profiler Data in U.S. Weather Forecasting. *Bulletin of the American Meteorological Society* **2004**, 85 (12), 1871–1886. <https://doi.org/10.1175/BAMS-85-12-1871>.

- [66] Illingworth, A. J.; Cimini, D.; Gaffard, C. et al. Exploiting Existing Ground-Based Remote Sensing Networks to Improve High-Resolution Weather Forecasts. *Bulletin of the American Meteorological Society* **2015**, 96 (12), 2107–2125. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-13-00283.1>.
 - [67] Soldatenko, S.; Tingwell, C.; Steinle, P. et al. Assessing the Impact of Surface and Upper-Air Observations on the Forecast Skill of the ACCESS Numerical Weather Prediction Model over Australia. *Atmosphere* **2018**, 9 (1), 23. <https://doi.org/10.3390/atmos9010023>.
 - [68] World Meteorological Organization (WMO). *Experience of the Japan Meteorological Agency with the Operation of Wind Profilers*. Instrument and Observing Methods Report No. 110; WMO: Geneva, 2012.
-

ПРИЛОЖЕНИЕ В. НАЗЕМНОЕ ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВЕТРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕТЕРОДИННЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ДОПЛЕРОВСКИХ ЛИДАРОВ

(В настоящем приложении представлен текст общего стандарта ИСО/ВМО. Он также публикуется, с идентичным содержанием, как ISO 28902-2:2017 (E))

ВВЕДЕНИЕ

Лидары (обнаружение и определение дальности с помощью света), в рамках данного приложения имеются в виду атмосферные лидары, зарекомендовали себя в качестве ценных систем для дистанционного зондирования загрязнений в атмосфере, а также параметров различных метеорологических элементов, таких как облака, аэрозоли, газы и (где имеется доплеровское устройство) ветер. Измерения могут проводиться без прямого контакта и в любом направлении, поскольку для зондирования целей используется электромагнитное излучение. Лидарные системы, таким образом, дополняют традиционные технологии измерений *in situ*. Они пригодны для широкого ряда задач, которые не могут быть корректно и качественно решены при помощи методов *in situ* или точечных измерений.

Существует несколько методов, в рамках которых для измерения атмосферного ветра может быть использован лидар. Четыре наиболее часто используемые системы включают импульсный и непрерывный когерентные ветровые доплеровские лидары, ветровой доплеровский лидар прямого обнаружения и резонансный ветровой доплеровский лидар (обычно используется для измерений в мезосферном натриевом слое). Дополнительную информацию см. в библиографических ссылках [1] и [2].

В настоящем приложении¹ описано использование гетеродинных импульсных доплеровских лидарных систем. Некоторая общая информация о непрерывных доплеровских лидарах содержится в [добавлении А](#). Международный стандарт по данной системе находится в стадии разработки.

1. ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ

В данном приложении сформулированы требования и процедуры проверок эффективности для гетеродинных импульсных доплеровских лидаров, а также описаны преимущества и ограничения, связанные с их использованием. Термин «доплеровский лидар», используемый в этом приложении, применяется исключительно к гетеродинным импульсным лидарным системам, которые используются для измерения параметров ветра при помощи аэрозольного рассеяния лазерного излучения в атмосфере. Представленные характеристики лидарных систем и ограничения, связанные с их использованием, относятся к работе в стандартных атмосферных условиях.

В настоящем приложении приведено описание определения скорости ветра по линии визирования (радиальной скорости ветра).

Примечание: описание получения вектора ветра с помощью проведения отдельных измерений по линии визирования не представлено в настоящем приложении, поскольку является специфическим для конкретной конфигурации ветрового лидара. Пример определения вектора ветра содержится в [добавлении В](#).

В данном приложении не рассматривается получение вектора ветра.

¹ Хотя в Руководстве по метеорологическим приборам и методам наблюдений (ВМО-№ 8) это называется приложением, в документации ИСО на него ссылаются как на «стандарт».

Настоящее приложение может быть использовано для следующих областей применений:

- a) метеорологический инструктаж, например для авиации, безопасности аэропортов, морских применений и нефтяных платформ;
- b) производство ветровой энергии, например оценка участка и определение силовых характеристик;
- c) регулярные измерения профилей ветра на метеорологических станциях;
- d) мониторинг распространения загрязнений в атмосфере;
- e) менеджмент промышленных рисков (с помощью прямого мониторинга данных или путем усвоения в микромасштабных моделях потока);
- f) обменные процессы (выбросы парниковых газов).

Настоящее приложение обращено к производителям гетеродинных импульсных доплеровских ветровых лидаров, а также к органам, которые занимаются проверкой и сертификацией их соответствия. Кроме того, в приложении содержатся рекомендации для пользователей по надлежащему использованию этих приборов.

2. НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ

Нормативные ссылки в настоящем приложении не содержатся.

3. ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Для целей настоящего приложения применяются следующие термины и определения.

Весовая функция дальности. Весовая функция радиальной скорости ветра по линии визирования.

Временное разрешение. Переменная, связанная с оборудованием, описывающая кратчайший интервал времени, с которого может быть получена независимая сигнальная информация.

Источник: ISO 28902-1:2012, термин 3.11

Время интегрирования. Время, потраченное на получение значения скорости по линии визирования.

Диапазон разрешения по дальности. Постоянный пространственный интервал между центрами двух последующих *стробов дальности*.

Примечание: диапазон разрешения по дальности также является размером строба дальности на дисплее. Он определяется длиной строба дальности и перекрытием между последовательными стробами.

Диапазон скоростей. Диапазон, определяемый минимальной измеряемой скоростью ветра, максимальной измеряемой скоростью ветра и способностью измерять однозначно знак скорости (недвусмысленно).

Примечание: в зависимости от применения лидара диапазон скоростей может определяться на основе радиальной скорости ветра (сканирующие лидары) или горизонтальных скоростей ветра (профили ветра).

Доступность данных. Отношение объема реальных рассматриваемых данных измерений с заданным качеством к объему ожидаемых данных измерений в рамках рассматриваемого *периода измерений*.

Коэффициент ослабления, α . Мера мутности атмосферы, выраженная с помощью натурального логарифма отношения интенсивности падающего света к переданной интенсивности света на единицу оптической длины.

Источник: ISO 28902-1:2012, термин 3.10

Максимальная дальность обнаружения, R_{MaxA} . Максимальное расстояние, до которого сигнал лидара записывается и обрабатывается.

Примечание: зависит от количества точек захвата и частоты измерений.

Максимальная дальность действия, R_{MaxO} . Максимальное расстояние, до которого может быть получено достоверное значение скорости ветра на основе сигнала лидара.

Примечания:

1. Максимальная дальность действия меньше или равна максимальной дальности обнаружения.
2. Максимальная дальность действия определяется вдоль оси в соответствии с типом применения. Она измеряется вертикально для получения вертикального профиля ветра и горизонтально — для сканирующих лидаров, способных производить измерения во всей полусфере.
3. Максимальная дальность действия может быть увеличена путем увеличения периода измерений и/или путем понижения разрешения дальности.
4. Максимальная дальность действия зависит от параметров лидара, а также от атмосферных условий.

Минимальная дальность обнаружения, R_{MinA} . Минимальное расстояние, с которого сигнал лидара записывается и обрабатывается.

Примечание: если минимальная дальность обнаружения не определена, предполагается, что она равна нулю. Она может отличаться от нуля, когда имеет место «слепой» прием в процессе импульсного излучения.

Минимальная дальность действия, R_{MinO} . Минимальное расстояние, до которого может быть получено достоверное значение скорости ветра на основе сигнала лидара.

Примечания:

1. Минимальная дальность действия также называется «слепой» дальностью.
2. В импульсных лидарах минимальная дальность действия ограничена рассеянным световым излучением в лидаре в ходе излучения импульса, глубиной фокуса или временем переключения индикатора приемопередатчика. Она может зависеть от длительности импульса (T_p) и ширины строба дальности.

Период измерений. Период времени между первым и последним измерениями.

Погрешность скорости. Максимальное инструментальное смещение при измерении скорости.

Примечание: смещение скорости должно быть минимизировано путем надлежащей калибровки, например по фиксированной цели.

Разрешение по дальности. Переменная, связанная с оборудованием, описывающая кратчайший интервал дальности, с которого может быть получена независимая сигнальная информация.

Источник: ISO 28902-1:2012, термин 3.13

Разрешение по скорости. Стандартное отклонение скорости, измеренной прибором.

Примечание: разрешение по скорости зависит от длительности импульса, отношения мощности сигнала несущей частоты к шуму и от времени интегрирования.

Разрешение физической дальности. Ширина (ПШПМ) *весовой функции дальности*.

Сдвиг ветра. Изменение скорости ветра по плоскости, перпендикулярной вектору направления ветра.

Строб дальности. Ширина (ПШПМ) *весовой функции* при селектировании точек во временных рядах с целью спектральной обработки и вычисления скорости ветра.

Примечания:

1. Строб дальности центрирован по расстоянию измерения.
2. Строб дальности определен в ряде элементов сигнала или строба дальности эквивалентного расстояния.

Эффективное разрешение по дальности. Переменная, зависящая от типа применения, описывает интегральный интервал дальности, для которого целевая переменная получается с заданной неопределенностью.

Источник: ISO 28902-1:2012, термин 3.14

Эффективное временное разрешение. Переменная, зависящая от типа применения, описывает интегральный временной интервал, для которого целевая переменная получается с заданной неопределенностью.

Источник: ISO 28902-1:2012, термин 3.12, модифицирован

4. ОСНОВЫ ГЕТЕРОДИННЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ДОПЛЕРОВСКИХ ЛИДАРОВ

4.1 Обзор

Импульсный доплеровский лидар испускает лазерный импульс в узком лазерном луче (см. рисунок 5.B.1). В процессе его распространения в атмосфере лазерное излучение рассеивается во всех направлениях аэрозолями и молекулами. Часть рассеянного излучения распространяется обратно к лидару; оно попадает в телескоп, детектируется и анализируется. Поскольку аэрозоли и молекулы движутся с атмосферой, доплеровский сдвиг обуславливает частоту рассеянного лазерного излучения.

На длинах волн (и, таким образом, частотах), относящихся к гетеродинному (когерентному) доплеровскому лидару, аэрозольный сигнал представляет собой основную цель для измерения сигнала обратного рассеяния.

Цель анализа заключается в измерении разницы Δf между частотой испускаемого лазерного импульса f_t и частотой обратного рассеяния света f_r . Согласно уравнению Доплера эта разница пропорциональна составляющей скорости ветра по линии визирования, как свидетельствует формула 5.B.1:

$$\Delta f = f_r - f_t = -2v_r / \lambda \quad (5.B.1)$$

где:

λ длина волны лазера;

v_r составляющая скорости ветра по линии визирования (составляющая вектора ветра, $\vec{v}$, направленная вдоль оси лазерного луча, считается положительной, когда ветер дует по направлению от лидара).

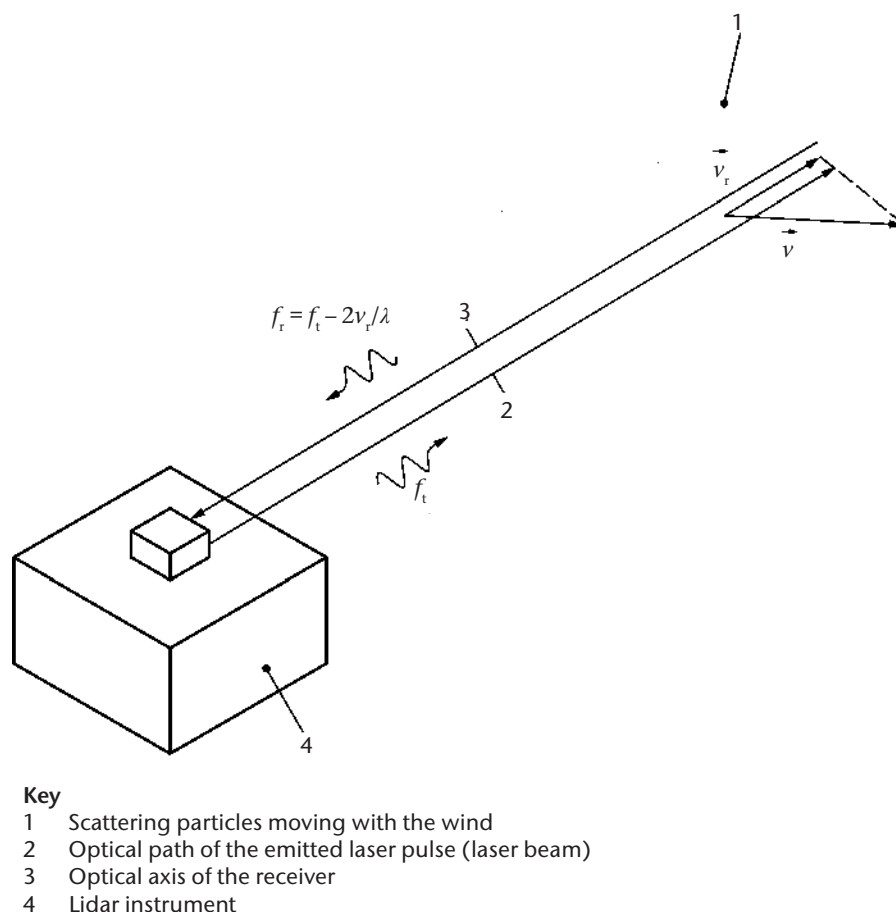


Рисунок 5.В.1. Принцип измерения с помощью гетеродинного доплеровского лидара

Предметом измерения является дальность x , равная расстоянию, которое проходит обратное рассеянное излучение за время t после испускания лазерного импульса от лидара до аэрозолей и обратно до лидара со скоростью света c . Формула 5.В.2 показывает линейную связь между дальностью и временем.

$$x = c \cdot \frac{t}{2} \quad (5.В.2)$$

4.2 Гетеродинное детектирование

В гетеродинном лидаре детектирование света, получаемого приемным телескопом (на частоте $f_r = f_t + \Delta f$), схематически изображено на рисунке 5.В.2. Полученный свет микшируется с лучом высокоустойчивого лазера непрерывного излучения, который называется гетеродин. Сумма двух электромагнитных волн — обратно отраженной и гетеродина — трансформируется в электрический сигнал с помощью квадратичного детектора (который производит электрический ток, пропорциональный мощности электромагнитной волны, освещающей светочувствительную поверхность). Для устранения низкочастотных составляющих сигнала затем применяется аналоговый высокочастотный фильтр.

Результатом является ток $i(t)$, пульсирующий на радиочастоте $f_t + \Delta f - f_{lo}$:

$$i(t) = \underbrace{2 \cdot \frac{\eta \cdot e}{h \cdot f_t} \cdot K \cdot \xi(t) \cdot \sqrt{\gamma(t) \cdot P_r(t) \cdot P_{lo}} \cdot \cos[2\pi(\Delta f + f_t - f_{lo}) \cdot t + \varphi(t)] + n(t)}_{i_{het}(t)} \quad (5.B.3)$$

где:

t время;

h постоянная Планка;

η квантовая эффективность детектора;

e электрический заряд электрона;

K инструментальная постоянная с учетом потерь при прохождении через приемник;

$\xi(t)$ случайная модуляция амплитуды сигнала за счет образования спекл-структуры (см. 4.5.4);

$\gamma(t)$ эффективность гетеродина;

$P_r(t)$ мощность обратно рассеянного света;

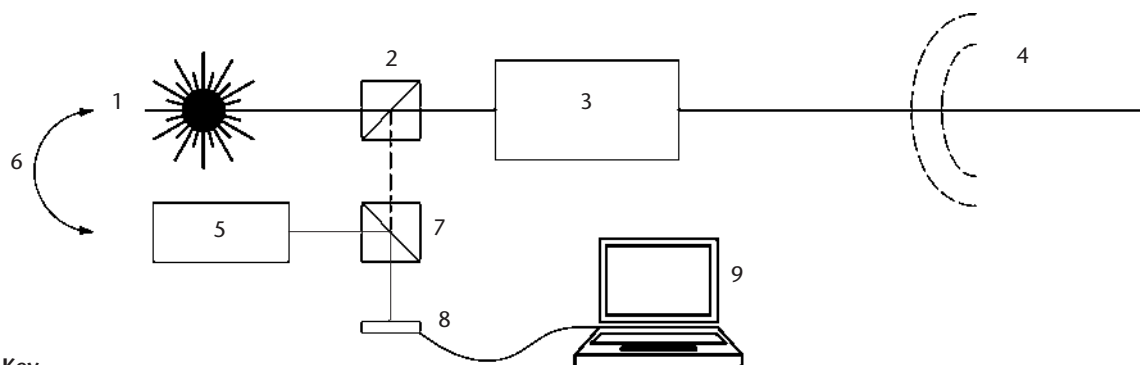
P_{lo} мощность гетеродина;

f_{lo} частота гетеродина;

$\varphi(t)$ случайная фаза;

$n(t)$ белый шум детектирования;

$i_{het}(t)$ сигнал гетеродина.



Key

- 1 Pulsed laser
- 2 Optical element separating the received and emitted lights
- 3 Telescope (used for transmitting and receiving)
- 4 Scatterers
- 5 Local oscillator laser (continuous-wave laser)
- 6 Frequency control loop (this device sets the difference, $f_t - f_{lo}$)
- 7 Optical element aligning the beam of the local oscillator along the optical axis of the received light beam and mixing them together
- 8 Quadratic detector
- 9 Analogue-to-digital converter and digital signal processing unit

Рисунок 5.B.2. Принцип гетеродинного детектирования

Эффективность гетеродина $\gamma(t)$ — это мера для измерения качества оптического микширования полей волны обратного рассеяния и гетеродинной волны на поверхности детектора. Она не может быть больше 1. Хорошая эффективность гетеродина требует точного определения величин и настроек гетеродина по отношению к обратно рассеянной волне. Оптимальные условия микширования рассмотрены в ссылке [3]. Эффективность гетеродина не является исключительно инструментальной функцией; она также зависит от турбулентности рефракционного индекса (C_n^2) вдоль лазерного луча (см. ссылку [4]). В условиях сильной атмосферной турбулентности воздействие на изменение рефракционного индекса снижает эффективность гетеродина. Это может произойти, когда лидар функционирует вблизи поверхности Земли в жаркий солнечный день.

В формуле 5.B.4 $P_r(t)$ — мгновенная мощность обратно рассеянного света. Она представлена основным уравнением оптической локации (см. ссылку [3]):

$$P_r(t) = A \cdot \int_0^{+\infty} x^{-2} \cdot G(x) \cdot g\left(t - \frac{2x}{c}\right) \cdot \beta(x) \cdot \tau^2(x) dx \quad (5.B.4)$$

при этом

$$\tau(x) = \exp\left[-\int_0^x \alpha(\zeta) d\zeta\right]$$

где:

x — расстояние до лидара;

A — собирающая поверхность приемного телескопа;

$G(x)$ — зависящая от дальности функция чувствительности ($0 \leq G(x) \leq 1$), учитывающая, например, ослабление эффективности приемника на близком расстоянии, с тем чтобы избежать подавления сигнала детектора;

$g(t)$ — огибающая мощности лазерного импульса ($\int g(t) dt = E_0$, где E_0 — энергия лазерного импульса);

$\beta(x)$ — коэффициент обратного рассеяния исследуемой атмосферной цели;

$\tau(x)$ — прозрачность атмосферы как функция коэффициента ослабления, α .

4.3 Спектральный анализ

Получение результатов измерений радиальной скорости с использованием гетеродинных сигналов требует проведения частотного анализа. Он выполняется в цифровом представлении после аналого-цифрового преобразования гетеродинных сигналов. Обзор процесса представлен на рисунке 5.B.3. Частотный анализ применяется к временному интервалу $(t, t + \Delta t)$ и повторяется для заданного числа лидарных импульсов N . Интервал определяет строб дальности $(x, x + \Delta x)$, где $x = c \cdot t / 2$ и $\Delta x = c \cdot \Delta t / 2$. N связано с периодом интегрирования измерения $t_{\text{int}} = 1/f_{\text{PRF}}$ (f_{PRF} — частота повторения импульса). Анализ сигнала заключается в усреднении функций плотности мощности сигналов с селектированием по дальности. Затем для оценки центральной частоты пика сигнала используется алгоритм оценивания частоты. На рисунке 5.B.3 — это оценка $\hat{f}_{\text{het}}$ для частоты $f_{\text{het}} = \Delta f + f_t - f_{\text{lo}}$ гетеродинного сигнала.

Благодаря аналого-цифровому преобразованию интервал частоты, полученный с помощью частотного анализа, ограничен до $(0, +F_s/2)$ или $(-F_s/2, +F_s/2)$ для комплекснозначных сигналов, что ограничивает минимальные и максимальные значения

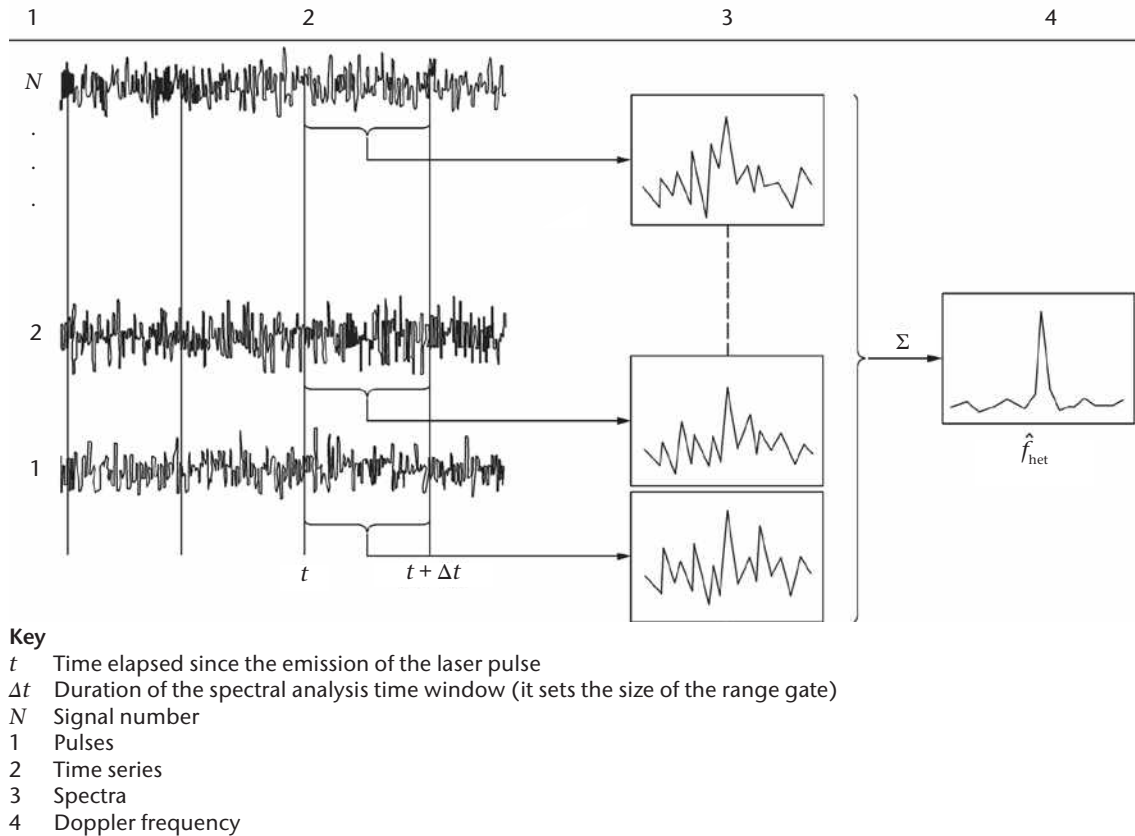


Рисунок 5.В.3. Диаграмма, показывающая проведение частотного анализа

f_{het} и, таким образом, интервал измеряемых радиальных скоростей. Согласно ссылке [5] по формуле 5.В.5 можно оценить среднее значение строка дальности реальной радиальной скорости ветра:

$$\hat{v}_r = -\frac{\lambda}{2} (\hat{f}_{\text{het}} - f_t + f_{l0}) \quad (5.В.5)$$

Например, в случае, когда сигнал является вещественной величиной (а не комплексной демодуляцией), смещение частоты $f_t - f_{l0}$ составляет около $F_s / 4$, т. е. $|\hat{v}_r| \leq \lambda F_s / 8$. С другой стороны, системная спецификация, предполагающая возможности для измерения радиальной составляющей ветра до v_{max} , требует $F_s \geq 8v_{\text{max}} / \lambda$.

Ядром усреднения является функция свертки между профилем импульса и профилем строка дальности. Ее длина является функцией отпечатка импульса в атмосфере, Δr (см. формулу 5.В.6), строка дальности Δx и весового коэффициента κ , где κ — отношение полной ширины на уровне половины максимума (ПШПМ) строка к Δx .

$$\Delta r = \frac{c \cdot T_p}{2} \quad (5.В.6)$$

где:

T_p продолжительность ПШПМ мгновенной интенсивности лазерного импульса, $g(t)$.

Разрешение по дальности ΔR определено как ПШПМ ядра усреднения. Для гауссового импульса и невзвешенного строка дальности ΔR рассчитывается по формуле 5.В.7^[6]:

$$\Delta R = \frac{c}{2} \cdot \frac{\Delta t}{\text{erf}\left(\frac{\sqrt{\pi} \cdot \Delta t}{2T_p}\right)} = \frac{\Delta x}{\text{erf}\left(\frac{\sqrt{\pi} \cdot \Delta x}{2\Delta r}\right)} \quad (5.В.7)$$

Для гауссового импульса и гауссового взвешенного строга дальности ΔR соответствует формуле 5.B.8:

$$\Delta R = \frac{c}{2} \cdot \sqrt{T_p^2 + (\kappa \cdot \Delta t)^2} = \sqrt{\Delta r^2 + (\kappa \cdot \Delta x)^2} \quad (5.B.8)$$

Как показано на рисунке 5.B.3, рассмотрены и селектированы по дальности несколько сигналов. Рассчитан средний спектр и применен алгоритм оценивания частоты.

Последовательные стробы дальности могут частично пересекаться (тогда последовательные результаты измерения радиальной скорости частично коррелируются), быть близкими или разделенными (тогда имеет место «дыра» в профиле радиальной скорости по линии визирования).

В ссылке [6] представлено несколько возможных алгоритмов оценивания частоты с первичным анализом их эффективности. Эффективность данных алгоритмов оценивания более подробно рассмотрена в ссылке [7]. Какой бы ни был алгоритм оценивания, функция плотности вероятности алгоритмов оценивания является суммой равномерного распределения «плохих» оценок (грубые ошибки), распределенных по всей ширине $[-f_{\max}, f_{\max}]$, и относительно узкого распределения хороших оценок, часто смоделированной при помощи гауссового распределения, как показано в формуле 5.B.9:

$$p(\hat{f}_{\text{het}}) = \begin{cases} \frac{b}{2f_{\max}} + \frac{1-b}{\sqrt{2\pi}\sigma_f} \exp\left(-\frac{(\hat{f}_{\text{het}} - \bar{f}_{\text{het}})^2}{2\sigma_f^2}\right), & \text{for } \hat{f}_r \in [-f_{\max}, f_{\max}] \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5.B.9)$$

В принципе средняя частота $\bar{f}_{\text{het}}$ может отличаться от «истинной» частоты гетеродинного сигнала f_{het} . Это может произойти, например, когда частота изменяется в процессе лазерного импульса (ЧИРП, см. ссылку [8]). Однако эти условия встречаются редко, и хороший гетеродинный доплеровский лидар на практике производит несмещенные измерения доплеровских сдвигов.

Параметр σ_f характеризует точность частоты алгоритма оценивания. Точность соответствующей радиальной скорости: $\sigma_v = \lambda \cdot \sigma_f / 2$. В гетеродинной системе, как правило, она составляет порядка от нескольких сантиметров до нескольких десятков сантиметров в секунду. Она уменьшается пропорционально уровню шума (мощность $n(t)$ в формуле 5.B.3) и увеличивается пропорционально числу суммированных сигналов N . На практике увеличение точности ограничено, поскольку суммирование большого количества сигналов приводит к увеличению времени интегрирования, в течение которого естественная изменчивость (турбулентность) ветра увеличивается.

В работе [9] приведено описание грубых ошибок (также называемые выбросами^[1]) и предложена модель для параметра b в качестве функции нескольких инструментальных характеристик и уровня определения шума. Выброс возникает, когда устройство обработки сигналов детектирует пик шума вместо пика сигнала. Параметр b является убывающей функцией отношения мощности сигнала на несущей частоте к шуму. В гетеродинных лидарных системах должны проводиться проверки качества, для того чтобы грубые ошибки были отфильтрованы и проигнорированы как пропущенные данные. Наличие грубых ошибок определяет максимальную дальность лидара.

4.4 Целевые переменные

Цель измерений, произведенных с помощью гетеродинных доплеровских ветровых лидаров, заключается в определении характера ветровых полей. В каждом интервале дальности оценка измеряемой переменной приводит к значению радиальной скорости; см. формулу 5.B.5.

Существуют дополнительные целевые значения, такие как изменчивость радиальной скорости, которые не рассматриваются в настоящем приложении.

Целевые переменные могут быть использованы в качестве исходных данных в различных методах производства метеорологической продукции, такой как вектор ветра в точке или по линии (профиль) в произвольной плоскости или в пространстве в целом. Это также включает измерение сдвигов ветра и вихрей спутных струй за воздушным судном (см. рисунок в [добавлении С](#)), а также определение областей восходящих или нисходящих потоков ветра. Помимо этого, измерения с помощью доплеровских ветровых лидаров нацелены на определение кинематических свойств и параметров неомогенных ветровых полей, таких как дивергенция и ротация. См. примеры применений в [добавлении С](#).

4.5 Источники шума и неопределенностей

4.5.1 Гетеродинный флуктуационный шум

Флуктуационный шум обозначается как $n(t)$ в формуле 5.В.3. Его изменчивость пропорциональна мощности гетеродина, как показано в формуле 5.В.10:

$$\langle n_{SN}^2 \rangle = 2eSP_{\text{гет}}B \quad (5.В.10)$$

где:

S чувствительность детектора, $S = \frac{\eta e}{hf_t}$, где η — квантовая эффективность детектора;

B ширина детектируемой полосы частот.

Он является причиной грубых ошибок и ограничивает максимальную дальность сигнала. Если не преобладают другие источники шума, сила гетеродинного сигнала по отношению к уровню шума измеряется отношением мощности сигнала на несущей к шуму (CNR), как показано в формуле 5.В.11^[6]:

$$\text{CNR} = \frac{\eta \cdot K \cdot \gamma(t)}{h \cdot f_t \cdot B} P_r(t) \quad (5.В.11)$$

Примечание: некоторые авторы иногда называют «отношение сигнал-шум», что обозначено здесь как «отношение мощности сигнала на несущей к шуму».

4.5.2 Шум детектора

Дополнительные технические источники шума могут влиять на отношение сигнал-шум. Как и для флуктуационного шума, их спектральная плотность является постоянной вдоль ширины детектируемой полосы частот (белый шум).

- а) темновой шум, создаваемый флуктуациями темнового тока детектора i_D , представлен в формуле 5.В.12:

$$\langle n_{DN}^2 \rangle = 2e i_D B \quad (5.В.12)$$

- б) тепловой шум (шум Джонсона/Найквиста) — это электронный шум, производимый в результате теплового возмущения электронов внутри нагрузочного резистора R_L при температуре T , как показано в формуле 5.В.13:

$$\langle n_{TN}^2 \rangle = \frac{4k_B T}{R_L} B \quad (5.В.13)$$

где k_B — постоянная Больцмана.

4.5.3 **Относительный шум интенсивности**

Относительный шум интенсивности (дБ/Гц) — это шум мощности гетеродина, нормализованный по среднему уровню мощности. Относительный шум интенсивности (RIN), как правило, достигает пика на частоте релаксационных колебаний лазера, затем снижается на более высоких частотах до тех пор, пока не достигнет уровня флуктуационного шума («розового» шума). Ток RIN увеличивается пропорционально квадрату мощности гетеродина.

$$n_{\text{RIN}}^2 = (SP_{\text{lo}})^2 10^{0.1\text{RIN}_B} \quad (5.B.14)$$

В хорошей лидарной системе значения i_D , RIN, $1/R_L$ достаточно низкие, поэтому флуктуационный шум гетеродина является преобладающим источником шума. Только в этом случае формула 5.B.14 применима.

4.5.4 **Спекл-структура**

Гетеродинный сигнал для когерентного доплеровского ветрового лидара является суммой многих волн, обратно отраженных от отдельных аэрозольных частиц. Поскольку частицы в случайном порядке распределены вдоль луча в объемах, значительно превышающих длину волны лазера, обратно отраженные волны имеют случайную фазу, когда они достигают чувствительной поверхности детектора, в связи с чем они суммируются случайным образом. В результате гетеродинный сигнал имеет случайную фазу и амплитуду. Это явление называется спекл-структура (см. ссылку [10]). Она ограничивает точность оценок частоты.

4.5.5 **Частота лазера**

Точное измерение радиальной скорости требует точного значения величины $f_t - f_{\text{lo}}$. Любая неопределенность данного значения ведет к отклонениям значения $\hat{f}_t$. Если частота лазера f_t не стабильна, она должна быть либо измерена, либо закреплена на f_{lo} .

4.6 **Установление дальности**

Установление дальности доплеровских измерений обусловлено временем, прошедшим с момента испускания лазерного импульса. Это время должно быть измерено с хорошей точностью (ошибка ε_t должна быть меньше или равна $2\delta \cdot x / c$, где $\delta \cdot x$ — требуемая точность установления дальности). Это требует, в частности, определения времени испускания лазерного импульса по крайней мере с данной точностью.

4.7 **Известные ограничения**

Принцип работы доплеровских лидаров основан на обратном аэрозольном рассеянии. Аэрозоли большей частью образуются у поверхности земли и поднимаются вверх на большие высоты в результате конвекции или турбулентности. Вследствие этого они в больших количествах содержатся в планетарном пограничном слое (как правило, 1 000 м толщиной в течение дня в умеренных зонах и 3 000 м в тропических регионах), но в гораздо меньших концентрациях выше. В этой связи для доплеровских лидаров измерение параметров ветра выше планетарного пограничного слоя является почти невозможной задачей, за исключением случаев присутствия на больших высотах аэрозольных слоев, таких как пустынная пыль или шлейфы вулканических выбросов.

Лазерные лучи сильно ослабляются в тумане или облаках. Вследствие этого максимальная дальность доплеровских лидаров значительно ограничена в условиях тумана (в лучшем случае несколько сотен метров), и они не могут измерять параметры ветра внутри облаков.

или над ними. Они могут проникать в невидимые вооруженным глазом облака, такие как перистые. Поэтому информация о ветре на больших высотах (от 8 до 12 км) может быть получена с помощью обратного рассеяния от кристаллических частиц.

Доплеровские лидары обнаруживают капли облачной воды или ледяные кристаллы, когда они присутствуют в атмосфере. Поскольку они являются эффективными отражателями, они могут играть ведущую роль в отраженных сигналах от атмосферы, например в случае сильных осадков. В этом случае доплеровский лидар произведет измерение радиальной скорости гидрометеоров, а не радиальной скорости ветра.

Нисходящие потоки дождя в атмосфере приносят аэрозоли на Землю. Дальность доплеровского лидара после дождя, как правило, значительно снижена до тех пор, пока аэрозоли снова не поднимутся вверх.

Присутствие дождевой воды на окне доплеровского лидара значительно уменьшает пропускание окна. Если лидар не оснащен приборами для протирки или сдува воды, окно следует протирать вручную.

Как описано в 4.2, эффективность гетеродинного детектирования снижается в случае наличия турбулентности рефрактивного индекса вдоль луча. Турбулентность рефрактивного индекса в большинстве случаев имеет место около поверхности Земли в солнечные дни. Таким образом, максимальная дальность доплеровского лидара, направленного горизонтально близко к поверхности, в таких условиях может значительно снизиться.

5. СПЕЦИФИКАЦИИ И ИСПЫТАНИЯ СИСТЕМЫ

5.1 Спецификации системы

5.1.1 Характеристики передатчика

5.1.1.1 Длина волны лазера

Длина волны лазера главным образом зависит от технологии, используемой при создании лазерного источника. Большинство существующих методов основаны на использовании излучения ближней инфракрасной области спектра с длинами волн от 1,5 до 2,1 мкм, хотя могут использоваться и другие длины волн до 10,6 мкм. При выборе длины волны учитываются ожидаемые параметры мощности, а также прозрачность атмосферы и требования безопасности при работе с лазерами (см. ссылки [11] и [12]). Фактически выбор диапазона длин волн от 1,5 до 2,1 мкм является компромиссом между технологическими соображениями и соображениями безопасности (> 1,4 мкм безопасно для глаз).

5.1.1.2 Длительность импульса

Длительность лазерного импульса T_p — это ПШПМ огибающей лазерного импульса $g(t)$. T_p определяет глубину мгновенного зондирования атмосферы R_p с помощью лидара, как показано в формуле 5.B.15:

$$R_p = \frac{c \cdot T_p}{2} \quad (5.B.15)$$

Например, длительность импульса 200 нс соответствует глубине зондирования порядка 30 м.

5.1.1.3 Взаимосвязь точности измерения скорости и разрешающей способности по дальности с длительностью импульса

Существует критическая зависимость между длительностью импульса и двумя характеристиками, связанными с производительностью. Большая длительность импульса, в несколько сотен наносекунд, приводит к потенциально узкой ПШПМ спектра лазерного импульса (если можно избежать «чирпирования» (линейная частотная модуляция)), (см. преобразование Фурье по всему импульсу в ограниченном временном интервале). Это приводит к достаточно точному измерению ветра даже при очень низком соотношении сигнал-шум, но только в том случае, если можно избежать выбросов (см. 4.3). Высокая производительность оказывает негативное влияние на разрешающую способность по дальности. Импульс длительностью 1 мкс ограничивает эффективное разрешение по дальности примерно до 150 м (см. формулу 5.B.6).

5.1.1.4 Частота следования импульсов

Частота следования импульсов f_{PRF} — это частота испускания лазерных импульсов. f_{PRF} определяет число импульсов, посланных и усредненных по линии визирования в течение времени измерения. Она также определяет максимальный однозначный диапазон, где информация двух последовательных лазерных импульсов не будет перекрываться. Максимальный однозначный диапазон R_{MaxO} связан с f_{PRF} по формуле 5.B.16:

$$R_{\text{MaxO}} = \frac{c}{2f_{\text{PRF}_{\text{max}}}} \quad (5.B.16)$$

Например, для максимальной дальности действия 15 км максимальная f_{PRF} составляет 10 кГц.

В то же время для радаров определенные типы модуляции (по несущей частоте, частоте повторений и т. д.) могут компенсировать эту неоднозначность по дальности за границами R_{MaxO} .

5.1.2 Характеристики передатчика/приемника

Передатчик/приемник характеризуется, как минимум, параметрами, приведенными в таблице 5.B.1.

Таблица 5.B.1. Характеристики передатчика/приемника

Характеристики передатчика/приемника	Примечания
Диаметр апертуры	Физический размер апертуры прибора, который ограничивает передаваемые и принимаемые лучи
Диаметр лазерного луча и коэффициент усечения	Для гауссова пучка диаметр лазерного луча определяется как диаметр, измеренный при $1/e^2$ мощности в апертуре лидара. Диаметр лазерного луча определяет уровень освещенности, а следовательно, и безопасность для глаз. Коэффициент усечения — это отношение между диаметром, измеренным при $1/e^2$, и физическим размером апертуры прибора
Точка фокусировки	Обычно в импульсных лидарах используются коллимированные пучки. Для некоторых применений пучок может быть частично сфокусирован в заданной точке, чтобы максимизировать интенсивность пучка на измеряемых расстояниях. Интенсивность сигнала и, следовательно, точность значения скорости будут максимальными в этой конкретной точке

В принципе, импульсные системы являются моностатическими. Для систем, использующих режим непрерывной волны, также доступны и бистатические установки.

5.1.3 **Параметры дискретизации сигнала**

Дискретизация сигнала импульсного лидара в некотором диапазоне определяется параметрами, представленными в таблице 5.В.2.

Таблица 5.В.2. Параметры дискретизации сигнала

<i>Параметры дискретизации сигнала</i>	<i>Примечания</i>
Селекция по дальности	Положения строба дальности могут быть определены вдоль линии визирования
Ширина строба дальности	Задается выборочными точками или частотой стробирования на цифровом преобразователе. Должна выбираться близко к ширине импульса
Количество стробов дальности	Для обработки в реальном времени спектральная оценка всех стробов дальности должна быть рассчитана за время, меньшее времени интегрирования
Диапазон измерения радиальной скорости ветра	С помощью доплеровских лидарных систем скорость ветра может быть измерена с точностью до 0,1 м/с. Диапазон измерения ограничивается вблизи его верхнего предела только вследствие технической конструкции прибора, главным образом шириной полосы пропускания детектора. Для измерения доступен диапазон радиальных скоростей ветра более 70 м/с
Разрешение радиальной скорости	Разрешение скорости ветра является минимальной обнаруживаемой разницей скорости ветра в интервале времени и дистанции. Разрешение 0,1 м/с или более высокое может быть достигнуто путем усреднения

5.1.4 **Характеристики системы ориентации**

Характеристики системы ориентации приведены в таблице 5.В.3.

Таблица 5.В.3. Характеристики системы ориентации

<i>Характеристики системы ориентации</i>	<i>Примечания</i>
Азимутальный диапазон	При использовании устройства ориентации лидар может наводить свой лазерный луч с различными азимутальными углами от 0 до 2 π . Для поворотного оборудования без ограничений допускается постоянное поворотное управление вдоль вертикальной оси. Для устройств с ограниченным вращением следует использовать другие методы
Диапазон возвышения	Устройство ориентации может быть оснащено возможностью вращения вокруг горизонтальной оси. Потенциально возможно вращение на 360°. Для того, чтобы увидеть полу-полусферу атмосферы над лидаром, углы возвышения обычно устанавливаются в диапазоне от 0 до 180°. В любом случае, указание на нади́р может быть использовано для начального положения устройства
Угловая скорость	Угловая скорость — это скорость вращения устройства ориентации. Измерение может быть выполнено в процессе этого вращения. В этом случае информация о скорости ветра будет представлять собой среднее значение различных линий визирования в зондируемой области между начальным углом и углом остановки. В других сценариях измерения можно использовать так называемый метод «шага и взгляда» с фиксированным положением прибора в моменты измерения

Характеристики системы ориентации	Примечания
Угловое ускорение	Определяет, как быстро изменяется угловая скорость. Используется для сложных траекторий с быстрыми изменениями в направлении. При высоком угловом ускорении могут наблюдаться угловые промахи (проскакивания)
Точность ориентации	Относительная точность ориентации — это стандартное отклонение угловой разницы между фактическим положением в пределах прямой видимости (азимут и высота) и положением цели (система отсчета прибора). Абсолютная точность ориентации требует предварительной калибровки с помощью угловых датчиков (тангаж, крен, направление) (система географической привязки)
Угловое разрешение	Минимальный шаг угла, на который может смещаться линия визирования. Он может быть ограничен за счет понижающего коэффициента двигателя, положения, датчика или механического трения

5.2 **Связь между характеристиками системы и производительностью**

5.2.1 **Показатель качества**

Показатель качества (ПК) помогает сравнивать диапазон дальности действия лидаров, которые имеют различные параметры. Пример, приведенный на рисунке 5.В.4, позволяет классифицировать чувствительность импульсного лидара независимо от параметров атмосферы. Показатель качества выводится из основного уравнения оптической локации (см. формулу 5.В.4) и пропорционален спектру скорости CNR, который определяется по отношению к усредненной спектральной плотности как интенсивность пика Доплера деленная на стандартное отклонение спектрального шума, которое считается постоянным (белый шум). N — это число усредненных импульсов.

ПК определяется для набора параметров лидара, как показано в формуле 5.В.17:

$$FOM = \eta_{all} \cdot E \cdot T_p \cdot D^2 \cdot \sqrt{t_i \cdot f_{PRF}} \tag{5.В.17}$$

где:

η_{all} общая эффективность, принимая во внимание качество луча и изображения, общий коэффициент пропускания и усечения;

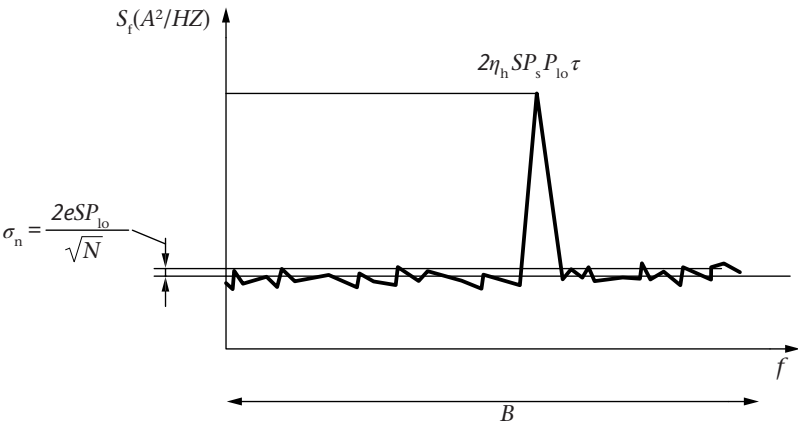


Рисунок 5.В.4. Пример показателя качества

- E энергия лазера на выходе из устройства (полученная энергия пропорциональна пиковой мощности и диаграмме направленности излучения;
- T_p длительность импульса (этот термин применяется к узкой полосе пропускания, обратно пропорциональной T_p);
- D диаметр собирающего телескопа (для типичных применений с большим радиусом действия оптимальный размер составляет от 100 до 150 мм при длине волны, соответствующей ближней инфракрасной области спектра);
- t_i время интегрирования для одной линии визирования;
- f_{PRF} частота следования импульсов.

ПК пропорционален квадратному корню из числа N накопленных спектров: $N = t_i \cdot f_{PRF}$.

При сравнении двух лидаров на двух различных длинах волн следует учитывать спектральную зависимость от параметров атмосферы. ПК должен быть рассчитан с временем интегрирования, меньшим или равным 1 с, с целью избежания колебаний ветра или турбулентности больше, чем доплеровская спектральная ширина.

Лидар может увеличить свой ПК с более длительным временем аккумуляции в рамках этого временного предела в 1 с.

Учитывая возможности современных оптических компонентов с низкой абберацией, η_{all} может быть оценена по результату передачи испускающего тракта и приемного тракта.

Следует отметить, что ПК для импульсного доплеровского лидара не может увеличиваться неограниченно за счет увеличения площади сбора D^2 , поскольку фазовое искажение поперек пучка из-за турбулентности рефракционного индекса ухудшает эффективность гетеродина^[3]. Практический предел для лидаров дальнего действия находится вблизи используемого диаметра $D = 125$ мм.

Поскольку спектр скорости CNR обратно пропорционален квадрату расстояния, то, если поглощением в атмосфере можно пренебречь, максимальная рабочая дальность действия приблизительно пропорциональна квадратному корню ПК. Когда ПК выражается в мДж·нс·м², максимальная рабочая дальность действия, выраженная в км, почти равна квадратному корню ПК.

В таблице 5.В.4 показаны вычисления ПК для типичных лидарных цифровых показателей и соответствующего им типичного диапазона измерений.

Таблица 5.В.4. Показатель качества для типичных лидарных цифровых показателей и соответствующего им типичного диапазона измерений

η	E (мДж)	T_p (нс)	D (м)	f_{PRF} (Гц)	t_i (с)	ПК (мДж·нс·м ²)	Типичный диапазон измерений (км)
0,5	0,2	800	0,12	10 000	1	115	10
0,5	0,1	400	0,06	20 000	1	10	3
0,5	2	300	0,12	750	1	118	10

5.2.2 **Компромиссы в отношении ширины полосы временных частот**

Рекомендуемой практикой является согласование длительности импульса с требуемым стробом дальности (см. 4.6), чтобы пространственное разрешение в равной степени зависело от этих двух параметров. При таком условии пространственное разрешение пропорционально длительности импульса. Чем короче импульс, тем лучше разрешение. Разрешающая способность по скорости пропорциональна спектральной ширине и увеличивается при узком спектре. Поскольку ширина спектра обратно пропорциональна длительности импульса, разрешение по расстоянию и разрешение по скорости также обратно пропорциональны.

5.3 **Точность и доступность результатов измерений**

5.3.1 **Точность измерения радиальной скорости**

Точность измерения радиальной скорости определяется (в соответствии с ISO 5725-1) имея в виду:

- a) правильность (или систематическую погрешность) как статистическое среднее различие между большим количеством измерений и истинным значением;
- b) прецизионность (или неопределенность) как статистическое стандартное отклонение серии независимых измерений. Это не имеет отношения к истинному значению.

Лидарные данные хорошего качества получаются, когда прецизионность измерений радиальной скорости выше целевого значения (например, 1 м/с) с предопределенной вероятностью возникновения (например, 95 %).

Значение погрешности (1σ) 0,5 м/с можно считать адекватным для типичных метеорологических применений и для измерений ветра с целью определения статистики категорий дисперсии в случае моделирования загрязнения воздуха^[13]. Для применений, связанных с энергией ветра, требования могут быть выше (0,2 м/с).

5.3.2 **Доступность данных**

Доступность данных определяется как отношение данных с прецизионностью P к общему количеству данных в течение периода измерения.

Доступность данных измерений, то есть определимость профиля ветра, является функцией, главным образом, концентрации аэрозоля и облаков. В зависимости от требуемой точности данных могут применяться другие критерии фильтрации. Например, данные, которые показывают существенно неоднородный поток вокруг диска сканирования, должны отбрасываться.

5.3.3 **Максимальная рабочая дальность действия**

Исходя из предположения о том, что лидарная линия визирования остается в планетарном пограничном слое (то есть отсутствие существенного изменения сигнала вдоль линии визирования), на рисунке 5.A.5 показана типичная доступность данных импульсного лидара в зависимости от расстояния.

В этом случае для 80 % доступности данных (P_{80}) дальность действия составляет 7 500 м.

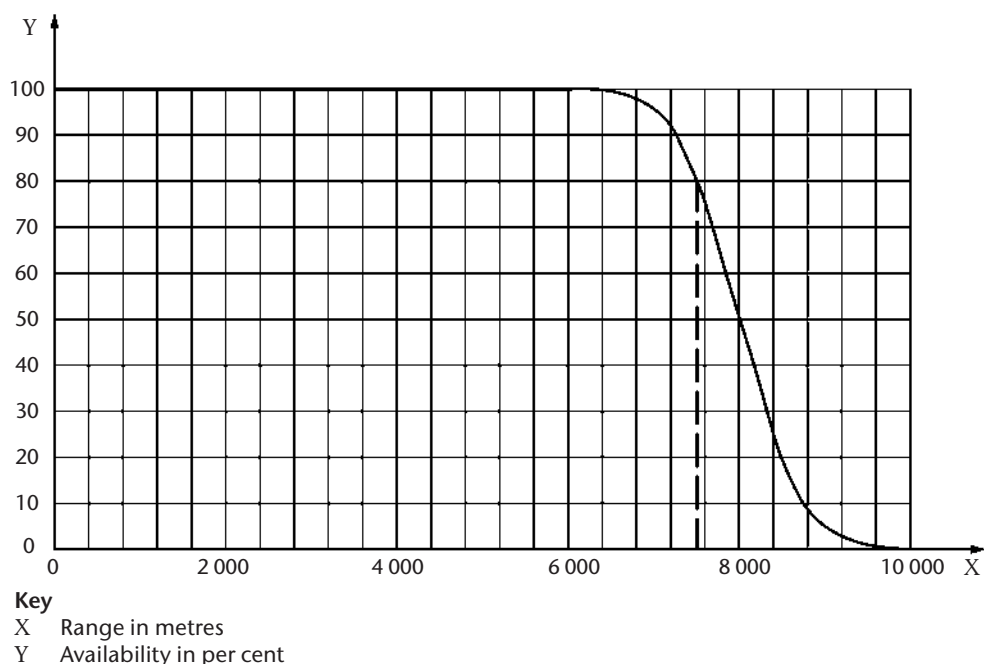


Рисунок 5.B.5. Пример максимальной рабочей дальности действия

Производительность, показанная на этой диаграмме, получена для стандартной атмосферы:

- a) отсутствие облаков вдоль линии визирования;
- b) отсутствие осадков;
- c) видимость более 10 км (чистый воздух).

Эта производительность будет значительно изменяться в зависимости от местных климатических и эксплуатационных условий. Данные с больших расстояний следует обрабатывать с осторожностью в зависимости от применения.

Диапазон измерений должен соответствовать заданным критериям доступности. Недавнее исследование этой зависимости описано в ссылке [14].

Например, R_{50} соответствует максимальной дальности действия с доступностью более 50 %.

Если доступность не указана, максимальная рабочая дальность действия предполагается равной R_{80} , то есть максимальному расстоянию, при котором доступность превышает 80 %.

Для заданной доступности изменение прецизионности скорости приводит к изменению максимальной рабочей дальности действия.

5.4 Процедуры испытаний

5.4.1 Общие замечания

Чтобы верно оценить точность целевых переменных, производитель должен выполнить ряд валидационных испытаний применительно к дальности действия и скорости. Некоторые испытания могут быть выполнены в лабораторных условиях. Определенные виды валидационных испытаний могут быть осуществлены только путем сравнения с другими эталонными приборами, такими как чашечные или звуковые анемометры.

5.4.2 Валидация измерений радиальной скорости

5.4.2.1 Общие замечания

В данном разделе описывается, как можно проверить и оценить качество измерений радиальной скорости.

5.4.2.2 Отражение от твердой мишени

Это испытание состоит в получении измерений ветра с помощью луча, направленного на стационарную (неподвижную) твердую мишень (любое строение в пределах дальности действия лидара), и проверке того, что данные измерения радиальной скорости, полученные с помощью лидара, составляют 0 м/с.

В результате этого испытания проверяется, что разность частот $f_t - f_{lo}$ между испускаемыми лазерными импульсами и гетеродином известна или определена с достаточной точностью (см. 4.5.3).

Длина строба дальности должна быть близка к длине лазерного импульса, а расстояния между стробами дальности должны быть выбраны таким образом, чтобы твердая мишень находилась точно в центре одного из стробов, в противном случае погрешность скорости может возникать в случае частотного дрейфа внутри импульса.

Измерение скорости с твердой мишенью должно проводиться как минимум в течение 10 мин. Испытание считается успешным, если среднее значение временного ряда радиальных скоростей, полученных с помощью твердой мишени, находится вблизи 0 м/с.

5.4.2.3 Самооценка прецизионности измерения радиальной скорости

В данном испытании луч импульсного лидара направлен вертикально вверх, а данные измерения радиальной скорости собираются в течение по меньшей мере 20 мин с частотой не менее одного профиля радиальных скоростей в секунду. Обозначим через $v_r(x, k)$, $k = 1, \dots, K$ временной ряд радиальных скоростей, измеренных на расстоянии x . Испытание состоит в формировании спектра мощности временного ряда, как показано в формуле 5.B.18:

$$V(x, f) = \frac{1}{K} \left| \sum_{k=1}^K v_r(x, k) \exp(-2j\pi f k \delta t) \right|^2 \quad (5.B.18)$$

где δt — постоянный временной лаг между последовательными измерениями $v_r(x, k)$.

В среднем, спектр мощности $V(x, f)$ должен выглядеть так, как показано на рисунке 5.B.6. На низких частотах в спектре мощности преобладают естественные колебания ветра, и он будет подчиняться закону $f^{5/3}$. На высоких частотах в спектре мощности преобладает ровный уровень ошибок измерения (белый шум). Уровень этой ровной части

непосредственно дает дисперсию значений этих измерений $\sigma_e^2(x)$.

Примечание: испытание должно проводиться ночью, когда естественная изменчивость ветра слаба, то есть когда ветер считается близким к штилю. Погрешности измерений в отдельных случаях могут быть намного больше, чем естественные колебания ветра. В этом случае часть спектра мощности, подчиняющаяся закону $f^{5/3}$, будет скрыта.

Данный метод, полное описание которого дано в ссылке [15], позволяет оценить прецизионность измерения лидара без каких-либо вспомогательных данных.

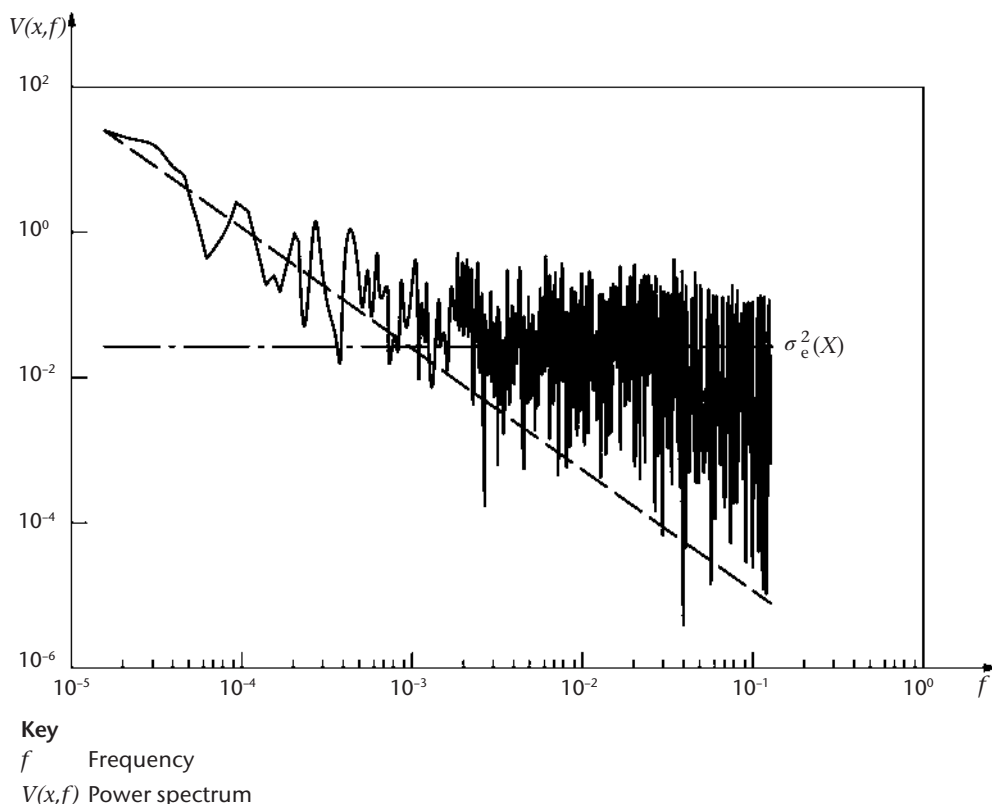


Рисунок 5.В.6. Спектр мощности измерений радиальной скорости

На рисунке 5.В.6 сплошная кривая — это $V(f)$. На низких частотах $V(f)$ должна быть пропорциональна $f^{5/3}$ (спектральное поведение естественной изменчивости ветра; штриховая линия). На высоких частотах спектр становится плоским (штрихпунктирная линия) на уровне, непосредственно равном дисперсии ошибок измерения $\sigma_e^2(x)$.

5.4.3 Оценка точности путем взаимного сравнения с другими приборами

5.4.3.1 Звуковой анемометр

Последнее испытание состоит в том, чтобы направлять лидарный луч очень близко к звуковому анемометру на мачте или платформе без вибрации и сравнивать радиальные скорости, полученные с помощью лидара, с проекцией трехмерных векторов ветра, полученных звуковым анемометром в направлении луча.

Данные лидара и звукового анемометра должны быть усреднены по одной минуте.

Направление лидарного луча должно определяться с высокой точностью (порядка 1° или точнее) и как можно ближе к горизонтальной плоскости. Лидарный луч должен находиться на высоте звукового анемометра (разность высот порядка 1 м или менее).

Среднеквадратическая разница между данными лидара и звукового анемометра должна быть меньше 0,1 м/с.

Мачта, скорее всего, вызовет возмущения вдоль ветрового потока после ее обтекания. Ветры с направлений, где звуковой анемометр находится в возмущенной зоне, не должны учитываться.

5.4.3.2 Функциональные испытания с использованием мачты

Мачта должна быть оснащена по крайней мере трехчашечными анемометрами, установленными горизонтально.

5.4.3.3 Сравнение с доплеровскими метеорологическими радиолокаторами

Одним из вариантов взаимосравнения доплеровского лидара и доплеровского метеорологического радиолокатора может быть совместное использование этих двух систем. Подробная информация об этом типе взаимного сравнения стала появляться по мере недавнего начала развертывания в аэропортах систем, объединяющих оба датчика для всепогодного дистанционного зондирования поля ветра, особенно для обнаружения сдвига ветра. Недавно были проведены соответствующие исследования^{[16]; [17]; [18]}. Для обеспечения уверенности в репрезентативности взаимосравнений, оба датчика должны быть размещены рядом и зондировать один и тот же объем атмосферы.

Помимо данного требования к размещению очень важно, чтобы были выбраны такие погодные условия, при которых измерения целевых трассеров с обоих датчиков реально представляли бы воздушный поток. Доплеровский лидар лучше всего работает в сухих погодных условиях, в то время как радар в таких условиях чистого воздуха измеряет только рассеянные сигналы, отраженные от насекомых. Такие рассеянные сигналы, отраженные от насекомых, не дают точного представления о фактическом движении воздуха. Разница в показаниях с доплеровским лидаром обычно достигает нескольких метров в секунду. Таким образом, чтобы иметь возможность не учитывать сигналы, отраженные от насекомых, необходимо обеспечить классификацию эхосигналов в контексте радиолокационных целей. Это означает, что радар должен быть способен измерять при двух ортогональных линейных поляризациях. С другой стороны, во время осадков условия являются оптимальными для радара, тогда как у лидара дальность действия может быть значительно ограничена. В погодных же условиях с небольшим дождем или моросью из слоистых облаков ожидается, что как радарный, так и лидарный датчик обеспечит высококачественные данные. Таким образом, именно такие ситуации лучше всего подходят для данной процедуры валидации. Для того чтобы избавиться от любых отражений от неметеорологических образований, необходимо провести соответствующую фильтрацию радиолокационных данных на основе классификации целей с использованием значений двойной поляризации.

Если эти требования выполнены, перекрестное сравнение доплеровского метеорологического радиолокатора и доплеровского лидара может быть выполнено на основе профилей горизонтального ветра, полученных, например, с использованием методов обработки объемной скорости или индикатора «скорость-азимут». В этом случае необходимо учитывать геометрию сканирования. В идеальном случае геометрия сканирования для радара и лидара должна быть одинаковой применительно к углам возвышения. Другим вариантом, который еще предстоит оценить, может быть сравнение фактических радиальных скоростей ветра в каком-либо строке дальности на основе стробов дальности лидарной и радарной систем.

5.4.3.4 Сравнение с радиолокационными ветровыми профилометрами

Сравнение с радиолокационными ветровыми профилометрами может быть выполнено, если две системы расположены рядом друг с другом. Погодные условия, при которых оба датчика работают оптимально, — это условия, которые не исключают друг друга (достаточные аэрозольные трассеры для лидара и достаточные турбулентные вихри в качестве мишеней для брэгговского рассеяния при профилировании ветра). Необходимо обеспечить, чтобы оба датчика находились в оптимальных атмосферных условиях. Кроме того, необходимо обратить внимание на режим сканирования, используемый для получения вертикального профиля ветра, чтобы объем, зондируемый лидаром, соответствовал объему, исследуемому профилометром.

5.4.4 Валидация максимальной рабочей дальности действия

В условиях ясного неба атмосфера может быть описана посредством видимости V , концентрации аэрозоля и типа аэрозоля. Последние два могут быть надлежащим образом описаны с помощью двух оптических лидарных коэффициентов ослабления и обратного рассеяния. В отличие от типа аэрозоля и его распределения по размерам, видимость (см., например, ISO 28902-1) и влажность измеряются стандартными наземными метеорологическими локальными датчиками. Для простоты типы атмосферы могут быть классифицированы на несколько категорий, связанных с их лидарным отношением. Значения лидарного отношения в ближней инфракрасной области обычно ограничены в диапазоне от 30 до 50 стерadianов. R_{MaxO} не слишком сильно зависит от изменчивости аэрозолей на месте, за исключением условий с локальными источниками загрязнения.

Видимость является важным параметром для диапазона лидара. Основное уравнение оптической локации (см. формулу 5.B.4) указывает, что полученная мощность пропорциональна коэффициенту обратного рассеяния и экспоненциально убывает при затухании и соответственно возрастает с видимостью. Поскольку $\alpha(x)$ и $\beta(x)$ пропорциональны, существует максимум функции $P_r(t)$ (см. основное уравнение оптической локации в формуле 5.B.4 и на рисунке 5.B.7) и следовательно для R_{MaxO} .

Чтобы не учитывать неблагоприятные условия видимости для когерентных доплеровских ветровых лидаров (туман и исключительно высокая видимость), для измерений дальности

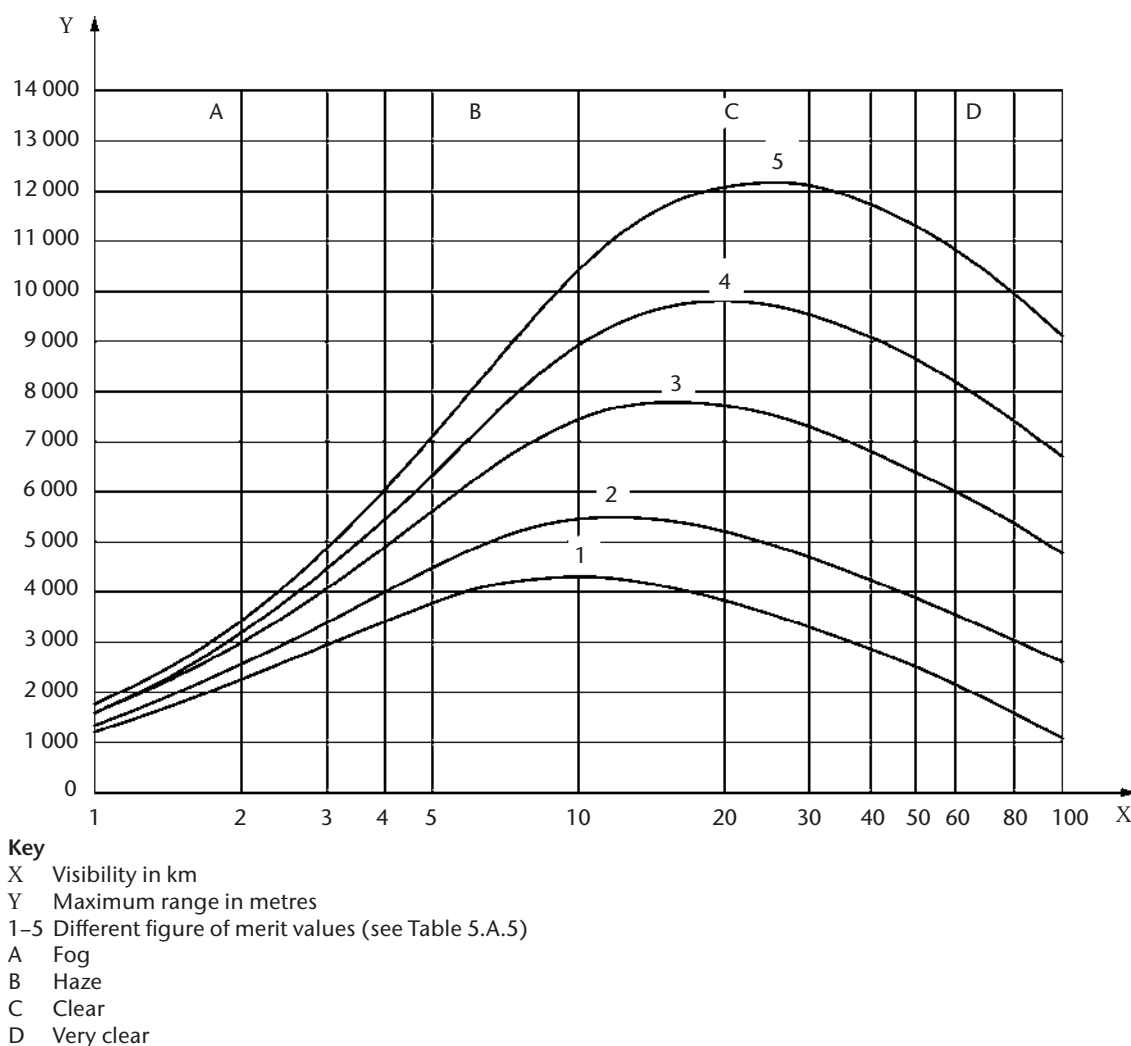


Рисунок 5.B.7. Зависимость максимальной дальности действия гетеродинного доплеровского сигнала от условий видимости

выбираются только дымка и хорошая видимость. Современные лидары могут работать в условиях осадков, но подвержены ошибкам в определении вертикальной составляющей ветра; горизонтальная составляющая, как было установлено, определяется с высокой точностью (см. ссылку [18]).

Таблица 5.В.5. Номера кривых

Номер кривой	1	2	3	4	5
Типичный ПК для времени интеграции в 1 с (мДж·нс·м ²)	20	30	60	100	150

Поскольку обратное рассеяние быстро изменяется при высоких значениях относительной влажности, данные, соответствующие относительной влажности > 70 %, должны быть исключены из набора данных измерений. Таким образом, условия осадков (дождь, снег) не учитываются.

Кроме того, турбулентность индекса C_n^2 (зависит от температуры и высоты) может менять R_{MaxO} путем изменения волнового фронта пучка. Условия сильной турбулентности должны быть удалены из наборов данных (солнечные дни около полудня), и необходимо следовать экспериментальному протоколу.

Таким образом, валидация должна проводиться при следующих условиях:

- лидар эксплуатируется в рабочем режиме (вертикальный — для профилировщиков, малая высота — для сканирующих лидаров);
- полный диапазон измерений остается в пограничном слое;
- видимость: более 10 и менее 50 км (на видимой длине волны, зависимость от длины волны приведена в ISO 28902-1);
- отсутствие осадков;
- отсутствие облаков на линии визирования;
- $C_n^2 < 10^{-14} \text{ м}^{-2/3}$ (1 м над уровнем земли).

Данные, не соответствующие этим условиям, при оценке максимальной рабочей дальности действия должны быть исключены.

- Ситуационные условия регистрируются одновременно (температура, C_n^2 , видимость, относительная влажность);
- наборы данных создаются в соответствии с вышеуказанными атмосферными условиями. Для получения качественного статистического набора данных требуется как минимум 100 ч отфильтрованных данных. Это представляет собой около четырех дней кумулятивных измерений со временем аккумуляции в 1 с. В зависимости от атмосферных условий период оценки может длиться от четырех дней до одного месяца.

6. ИНСТРУКЦИИ ПО ПЛАНИРОВАНИЮ ИЗМЕРЕНИЙ И УСТАНОВКЕ ПРИБОРОВ

6.1 Требования к месту установки

Выбор места проведения измерений прежде всего определяется задачей измерения. Тщательный выбор места измерения необходим, в частности, для стационарных систем или для квазистационарного использования мобильных систем во время проведения долгосрочных измерительных мероприятий. При выборе места измерения необходимо учитывать следующие факторы:

- a) свободный обзор: беспрепятственная видимость может быть ограничена застроенными участками, деревьями и зданиями вблизи места установки лидара. Если горизонтальный обзор ограничен зданиями, этого можно избежать, выбрав больший угол возвышения. В случае сканирования индикатора «скорость-азимут» измеренные сигналы, идущие не из свободной атмосферы, а от препятствий, должны быть исключены из оценки;
- b) электромагнитное излучение: доплеровские лидарные системы должны быть надлежащим образом защищены от воздействий электромагнитных излучений (например, от радиолокационных устройств, сетей мобильной радиосвязи или сотовых телефонных сетей).

Рекомендуется проводить предварительный осмотр предполагаемого участка проведения измерений с участием экспертов (таких, как метеорологи).

Для получения оптимальной рабочей дальности действия лидар должен быть установлен на грунте с короткой травой, без расположенных поблизости сооружений, которые могут вызвать атмосферную турбулентность, влияющую на работу лидара и его производительность. Лидар должен быть установлен как минимум на высоте 3 м над землей, особенно если он расположен не на травяном грунте, а, например, на бетоне, асфальте или ровной металлической платформе, для избежания эффекта от турбулентности вблизи оптического выхода, который приведет к разрушению когерентности атмосферы и, таким образом, резко уменьшит эффективность работы лидара.

6.2 Ограничивающие условия применительно к общему функционированию

Факторы помех касательно доплеровских лидарных измерений включают в себя:

- a) оптически плотные облака;
- b) осадки любого типа (дождь, град, снег);
- c) блокирующие эффекты (например, от зданий).

6.3 Техническое обслуживание и эксплуатационные испытания

6.3.1 Общие замечания

Чтобы обеспечить функционирование системы в соответствии с установленными требованиями и исключить отклонения и технические ошибки, такие как неправильные настройки^[19], техническое обслуживание и эксплуатационные испытания должны проводиться через регулярные промежутки времени. В дополнение к приведенной здесь информации типичные области применения и соответствующие требования описаны в [добавлении D](#).

6.3.2 **Техническое обслуживание**

Техническое обслуживание, такое как регулярная очистка оптических компонентов, калибровка и т. п., должно осуществляться в качестве одного из базовых требований в рамках обеспечения качества. Процедуры технического обслуживания могут проводиться персоналом на месте с использованием автоматического программного обеспечения обнаружения уменьшения мощности сигнала, например за счет пылевых отложений, и внесением соответствующих корректировок в данные или сочетания этих мер. Обычная периодичность технического обслуживания составляет три месяца и зависит от условий окружающей среды.

6.3.3 **Эксплуатационные испытания**

Эксплуатационные испытания следует проводить каждые 6—36 месяцев. Такие испытания зависят от конкретной конструкции системы. Изготовитель прибора должен указать процедуры испытаний и предоставить необходимые для этого инструменты.

- a) Выходную мощность и частоту лазерного источника следует измерять с периодичностью, указанной изготовителем;
- b) сигнальный выход системы сбора данных, реагирующей на определенный световой импульс или определенную цель, должен измеряться с периодичностью, указанной изготовителем;
- c) для систем сканирования или рулевого управления следует выполнить проверку выравнивания с помощью калиброванного прибора (например, буссоли или прибора, определяющего наклон).

6.3.4 **Неопределенность**

В таблице 5.В.6 указаны составляющие неопределенности в измеряемых переменных и скорости ветра по линии визирования. Факторы неопределенности измеряемых переменных влияют на качество данных, обеспечиваемых системой. Наиболее существенные неопределенности являются следствием:

- a) процесса первичной калибровки системы изготовителем;
- b) преобладающих условий окружающей среды.

Таблица 5.В.6. Факторы, приводящие к неопределенности

<i>Измеряемые переменные</i>	<i>Факторы, приводящие к неопределенности</i>
Отношение сигнал-шум	a) шум, включая шум детектора b) спекл-эффект (когда во время измерения усредняются только несколько импульсов) c) флуктуации мощности лазерного излучения или длительности импульса d) турбулентность рефракционного индекса (температура) e) угол запаздывания при высоких скоростях вращения
Частотный сдвиг, Δf	a) смещение и флуктуации частоты испускаемых импульсов по сравнению с частотой гетеродина b) длительность импульса c) отношение сигнал-шум d) количество усредненных импульсов e) качество алгоритма оценки

<i>Измеряемые переменные</i>	<i>Факторы, приводящие к неопределенности</i>
<i>Целевая переменная</i>	<i>Фактор неопределенности</i>
Скорость ветра по линии визирования (радиальная скорость ветра)	а) турбулентность ветра б) градиент ветра вдоль линии визирования в) твердые мишени, близкие к стробу дальности г) неоднозначность по дальности д) точность ориентации

ДОБАВЛЕНИЕ А. ДОПЛЕРОВСКИЙ ВЕТРОВОЙ ЛИДАР НЕПРЕРЫВНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

(Для информации)

Как указано в настоящем приложении, существует несколько методов, в рамках которых лидар может быть использован для измерения атмосферного ветра. Четыре наиболее распространенных из них включают использование когерентного доплеровского ветрового лидара импульсного или непрерывного действия, доплеровского ветрового лидара прямого обнаружения и резонансного доплеровского ветрового лидара (наиболее широко применяется для измерений в мезосферном натриевом слое).

В данном приложении описывается использование гетеродинных (когерентных) импульсных лидарных систем. Следует отметить, что в настоящее время также разрабатывается стандарт ISO 28902-3, в котором описывается применение когерентного доплеровского ветрового лидара непрерывного излучения для измерения атмосферного ветра. В стандарте ISO 28902-3 будут сформулированы требования и процедуры эксплуатационных испытаний для технологий доплеровских лидаров непрерывного излучения, а также будут представлены их преимущества и недостатки. Термин «доплеровский лидар непрерывного излучения» или «доплеровский ветровой лидар непрерывного излучения» используется в настоящем приложении применительно к лидарным системам, работающим в режиме незатухающей волны для измерения характеристик ветра на основе рассеяния лазерного излучения атмосферными аэрозолями в пограничном слое на малых высотах. Здесь представлено описание типичной геометрии измерений, способов обработки сигнала, технических требований и ограничений применительно к стандартным атмосферным условиям. Лидары непрерывного излучения применяются, в частности, с целью:

- a) измерения энергии ветра;
- b) оценки ветровых ресурсов;
- c) верификации кривой мощности;
- d) расчета коэффициента потерь при работе ветровой электростанции;
- e) мониторинга опасных ветровых явлений для целей авиационной метеорологии;
- f) оценки сдвига ветра;
- g) определения требований в отношении обнаружения вихревых следов самолетов.

Стандарт ISO 28902-3 будет предназначен для производителей доплеровских ветровых лидаров непрерывного излучения, а также для органов, занимающихся вопросами испытаний и сертификации соответствия. В нем также будут содержаться рекомендации для пользователей по правильному, надлежащему применению этих приборов. Будет прилагаться и полный библиографический перечень независимых публикаций.

ДОБАВЛЕНИЕ В. ВОССТАНОВЛЕНИЕ ВЕКТОРА ВЕТРА

(Для информации)

В.1 Общая информация

Ветер — это трехмерная векторная величина, где поле ветра представляет собой, как правило, функцию пространства и времени. Следовательно, для измерения мгновенного ветра в определенной точке всегда требуется определение трех компонент вектора. Посредством одного доплеровского лидара можно измерить лишь компоненту вектора ветра (или ее проекцию) вдоль оптической оси лазерного луча. Таким образом, для проведения точного местного измерения в какой-либо установленный срок потребуются три отдельные лидарные системы. При определенных допущениях можно осуществить оценку полного вектора ветра на основе данных единственного «моностатического» доплеровского лидара. Данный процесс называется восстановлением вектора ветра, поскольку точность оценки вектора ветра зависит от правильности допущений в отношении поля ветра.

В.2 Система координат

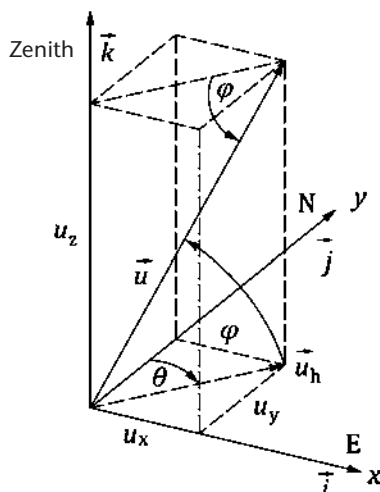
На рисунке ниже представлен вектор ветра $\vec{u}(\vec{r}, t)$ в декартовой системе координат с единичными векторами $\vec{i}$, $\vec{j}$, $\vec{k}$. Компоненты u_x , u_y , u_z являются скалярными функциями положения и времени, $\vec{r} = \vec{r}(x, y, z, t)$ — вектор положения или радиус-вектор воздушной частицы.

$$\vec{u} = \frac{d\vec{r}}{dt} = \begin{pmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \end{pmatrix} \quad (\text{B.1})$$

или

$$\vec{u} = (u_x \cdot \vec{i} + u_y \cdot \vec{j} + u_z \cdot \vec{k}) \quad (\text{B.2})$$

В системе координат на рисунке положительное направление оси x ($\vec{i}$) указывает на восток (E), положительное направление оси y ($\vec{j}$) — на север (N), а положительное направление оси z ($\vec{k}$) обращено к зениту.



Система координат и векторы ветра

С учетом значений углов θ и ϕ компоненты в декартовой системе координат определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} u_x &= U \cdot \cos \phi \cdot \sin \theta \\ u_y &= U \cdot \cos \phi \cdot \cos \theta \\ u_z &= U \cdot \sin \phi \end{aligned} \quad (\text{B.3})$$

а трехмерный вектор ветра рассчитывается как:

$$\vec{u} = \begin{pmatrix} U \cdot \cos \phi \cdot \sin \theta \\ U \cdot \cos \phi \cdot \cos \theta \\ U \cdot \sin \phi \end{pmatrix} \quad (\text{B.4})$$

Пример: горизонтальный западный ветер: $\theta = 90^\circ$, $\phi = 0^\circ$

$$\Rightarrow u_x = U, u_y = u_z = 0 \Rightarrow \vec{u} = (U, 0, 0)$$

B.3 Горизонтальный вектор ветра

Горизонтальный вектор ветра $\vec{u}_h$ и горизонтальная проекция трехмерного вектора ветра $\vec{u}$ на рисунке определяются следующим образом:

$$\vec{u}_h = \begin{pmatrix} u_x \\ u_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_h \cdot \sin \theta \\ u_h \cdot \cos \theta \end{pmatrix} \quad (\text{B.5})$$

или в системе обозначения компонент:

$$u_h = |\vec{u}_h| = U \cdot \cos \phi = \sqrt{u_x^2 + u_y^2} \quad (\text{B.6})$$

Величина u_h обозначает горизонтальную скорость ветра, обычно именуемую скоростью ветра. Традиционно в метеорологии направление ветра определяется как направление, обратное вектору ветра $\vec{u}_h$. Оно ориентировано по часовой стрелке с севера на восток, юг и запад (см. рисунок выше).

В случае, когда сканирование осуществляется лидаром на диск при фиксированном угле возвышения в условиях однородного потока ветра, отдельные точки, образующие кривую скорости по линии визирования, следуют косинусоиду как функции азимутального угла. Пики функции соответствуют азимутальному углу, расположенному параллельно или встречно-параллельно направлению ветра. Функция проходит через ноль, когда азимутальный угол перпендикулярен пеленгу ветра, поскольку компонента скорости по линии визирования отсутствует. Данные также наглядно представляются на графике в полярных координатах, который сразу дает информацию о скорости, направлении и вертикальной составляющей ветра. Стандартная процедура выравнивания методом наименьших квадратов позволяет получить наилучшие оценки величин трех неизвестных параметров (либо u , v и w , либо горизонтальной и вертикальной составляющих скорости ветра и пеленга ветра).

B.4 Радиальная скорость

В измерениях, получаемых с помощью лидара, компонента v_r вектора местного ветра $\vec{u}(\vec{r}, t)$ в направлении лазерного луча, т. е. радиальная скорость в любой произвольной точке $\vec{r}$, является прямой измеряемой величиной, определяемой с помощью

доплеровского сдвига частоты (см. рисунок 5.В.5). Если вектор ветра $\vec{u}(\vec{r})$ задается в сферической системе координат $(\vec{e}_r, \vec{e}_\theta, \vec{e}_\phi)$ вместо декартовой системы координат $(\vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$ то радиальная скорость v_r легко поддается определению (сравните с формулой В.2)^[20]:

$$\vec{u}(\vec{r}) = \vec{u}(r, \theta, \phi) = (u_r \cdot \vec{e}_r + u_\theta \cdot \vec{e}_\theta + u_\phi \cdot \vec{e}_\phi) \quad (\text{В.7})$$

где:

- $\vec{e}_r$ единичный вектор в направлении луча;
- $\vec{e}_\theta, \vec{e}_\phi$ единичные векторы в направлении азимута и угла возвышения;
- u_r, u_θ, u_ϕ ортогональные составляющие вектора ветра системы координат, заданной в ходе сканирования.

Проекция вектора ветра $\vec{u}(\vec{r})$ на направление луча, т. е. скалярное произведение ($\circ$), может быть получена с помощью формулы В.8:

$$\vec{u}(\vec{r}) \circ \vec{e}_r = u_r \equiv v_r \equiv -v_{\text{LOS}} \quad (\text{В.8})$$

Обычно величина v_{LOS} равна отрицательному значению радиальной компоненты v_r вектора местного ветра в точке $\vec{r}$. Отрицательный знак v_{LOS} объясняется тем, что, по общему правилу, в лидарных системах скорость ветра считается положительной по отношению к лазеру.

С учетом известной формулы преобразования между сферическими и декартовыми координатами^[19] величину v_r можно выразить посредством компонент ветра u_x, u_y, u_z в декартовой системе координат следующим образом:

$$v_{\text{LOS}} = -v_r = -(u_x \cdot \cos \phi \cdot \sin \theta + u_y \cdot \cos \phi \cdot \cos \theta + u_z \cdot \sin \phi) \quad (\text{В.9})$$

В.5 Восстановление вектора ветра

Для определения (декартовых) компонент u_x, u_y, u_z вектора ветра посредством доплеровского ветрового лидара зондирование атмосферы должно производиться под разными углами.

Примечание: компоненты ветра u_x, u_y, u_z также часто обозначаются как u, v, w .

Однако все компоненты ветра, как правило, подвержены пространственным и временным колебаниям, поскольку поле ветра в целом не может рассматриваться как однородное и стационарное в силу различных мелкомасштабных атмосферных процессов, таких как гравитационные волны, конвекция, турбулентность или эффекты потока, вызванные орографическими факторами. Поэтому для того, чтобы получить оценку вектора ветра по радиальным компонентам, необходимо сделать допущения относительно однородности. Чем вернее допущение, тем в большей степени оценка соответствует фактическому полю ветра. Данная проблема подробно рассматривается в литературе и разъясняется в учебных пособиях как применительно к радиолокаторам, так и лидарам (см., например, ссылки [21] и [22]).

Таким образом, на основании того предположения, что поле ветра может считаться стационарным в течение периода измерения и горизонтально однородным в пределах объема выборки, т. е. если поле ветра является лишь функцией вертикальной координаты z , измерения радиальной составляющей ветра на фиксированной геометрической высоте задаются формулой В.10, простым матричным уравнением:

$$A \cdot u = v_r \quad (\text{В.10})$$

Строки данной ($n \times 3$) матрицы A состоят из единичных направляющих векторов, указывающих ориентацию лучей n . Вектор v_r также является n -мерным и включает радиальные составляющие ветра, полученные по направлениям ориентации n . Это ничто иное, как компактное обозначение n скалярных (внутренних) произведений, указанных в формуле В.8. Для $n = 3$ существует обратная матрица A^{-1} , если A имеет ранг 3 (например, все векторы-строки являются линейно независимыми), и вектор ветра может быть получен непосредственно с помощью формулы В.11:

$$u = A^{-1} \cdot v_r \quad (\text{В.11})$$

Для $n > 3$ и ранга $(A) = 3$ линейная система является переопределенной и либо имеет одно решение, либо не имеет никакого (точного) решения. Однако может быть найдено приближенное решение, которое приводит к минимизации функции $\|A \cdot u - v_r\|^2$. Это решение по методу наименьших квадратов может быть выражено посредством псевдообратной матрицы $(A^T A)^{-1} \cdot A^T$ для матрицы A , как показано в формуле В.12:

$$u = (A^T A)^{-1} \cdot A^T \cdot v_r \quad (\text{В.12})$$

A^T обозначает транспонированную матрицу A . Формула В.12 носит достаточно общий характер и описывает все возможные конфигурации сканирования по дискретным направлениям ориентации луча n . Для получения численно устойчивых результатов следует аккуратно использовать данную формулу на практике.

Двумя часто используемыми режимами сканирования для доплеровских лидаров являются метод доплеровского качания луча или методы сканирования индикатора «скорость-азимут».

В случае, когда используется метод доплеровского качания луча, измерения проводятся как минимум по трем линейно независимым направлениям. Этот метод дает возможность быстрой развертки, но может приводить к систематическим погрешностям в измерениях, если поле ветра неоднородно. Правильность допущений при восстановлении профиля (однородность и стационарность) может быть в определенной степени проверена, если использовать более трех направлений. Наглядный пример применения метода доплеровского качания луча со значениями $n = 3$ и $n = 4$ приводится в работе [23].

В случае, когда осуществляется сканирование индикатора «скорость-азимут», азимут направления луча изменяется в течение всего процесса непрерывного сканирования. Изменение азимутального угла в серии измерений приводит к получению набора различных проекций вектора местного ветра на направления измерений. Угол возвышения в процессе остается постоянным. Изначально метод индикатора «скорость-азимут» был предложен для горизонтально однородного поля ветра^[24]. Позднее методология была расширена для включения дополнительной линейной вариации компонент вектора^[25]. В случае, когда поле ветра однородно, результатом является синусоидальный профиль измеренной скорости v_{LOS} .

Если мощность лидара позволяет провести несколько сканирований по азимуту с различными углами возвышения в разумный срок, то можно объединить результаты сканирования, для того чтобы получить полнообъемное изображение. Это делает возможным использование более усовершенствованной модели поля ветра, которая может быть подстроена под вектор наблюдений за величиной v_r . Иными словами, по аналогии с формулой В.10, можно далее расширить ряд Тейлора, включив также сдвиг ветра, т. е. первые пространственные производные. Для доплеровских радиолокаторов

данная процедура является стандартной, она широко известна как «объемная обработка скорости». Впервые данная методика была опубликована в издании, приводимом в работе [26]. Этот анализ приводит к формуле В.13 вместо формулы В.10:

$$\begin{aligned}
 v_r = & \sin \theta \cdot \cos \phi \cdot u_0 + \cos \theta \cdot \cos \phi \cdot v_0 + \sin \phi \cdot w_0 \\
 & + r \cdot \sin^2 \theta \cdot \cos^2 \phi \cdot u'_x \\
 & + r \cdot \cos^2 \theta \cdot \cos^2 \phi \cdot v'_y \\
 & + r \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta \cdot \cos^2 \phi \cdot (u'_y + v'_x) \\
 & + \sin \phi \cdot (r \cdot \sin \phi - z_0) \cdot w'_z \\
 & + \sin \theta \cdot \cos \phi \cdot (r \cdot \sin \phi - z_0) \cdot (u'_z + w'_x) \\
 & + \cos \theta \cdot \cos \phi \cdot (r \cdot \sin \phi - z_0) \cdot (v'_z + w'_y)
 \end{aligned} \tag{B.13}$$

Следует отметить, что данная модель не позволяет получить информацию о горизонтальной завихренности, поскольку величины u'_y и v'_x представлены лишь в качестве суммы в формуле В.13. В публикации [16] описывается применение указанного метода к данным лидара и осуществлено сопоставление с данными, полученными посредством доплеровского метеорологического радиолокатора.

ДОБАВЛЕНИЕ С. ПРИМЕНЕНИЯ

(Для информации)

С.1 Ветроэнергетика

С.1.1 Общая информация

На сегодняшний день одна из основных проблем на рынке ветроэнергетики — это оптимальный расчет будущей выработки электроэнергии ветряной электростанцией. В настоящее время процедура расчета заключается в том, чтобы получить наилучшую возможную оценку потенциала энергии ветра на определенном участке, наилучшую оценку энергии, которую может вырабатывать ветряная турбина за счет поступающего свободного потока ветра, и оценить надлежащим образом общие производственные потери, которые могут возникать при работе ветряной электростанции. Некоторые из этих потерь могут быть вызваны турбулентными следами, потерей производительности ветряной турбины, простоем в связи с оперативным и профилактическим техническим обслуживанием ветроэнергетической установки, а также другими параметрами, которые могут влиять на общую работу ветряной электростанции. На сегодняшний день когерентный доплеровский лидар наземного базирования является целесообразным инструментом для использования на всех этапах работы ветроэлектростанции: от стадии разработки до ввода в эксплуатацию, функционирования и переоснащения старых электростанций.

С.1.2 Оценка ветровых ресурсов

В настоящее время наземные лидары для измерения вертикального профиля (как импульсные, так и непрерывного излучения) широко используются на рынке ветроэнергетики всеми крупными проектировщиками с целью обеспечения высокоточных данных о скорости ветра и сокращения неопределенности горизонтальных и вертикальных составляющих во время операций по оценке ветровых ресурсов. В настоящее время когерентный доплеровский лидар наземного базирования может использоваться в рамках подобных операций без каких-либо мачт, а получаемые в результате данные считаются пригодными для удовлетворяющих критериям банковского финансирования проектов. Учитывая размер ветряной турбины и высоту, которой она может достигать, лидар позволяет провести надлежащую оценку вертикального профиля ветра, имеющую принципиально важное значение при проектировании ветряной турбины. Двумя основными параметрами, которые следует учитывать как факторы, которые могут влиять на годовое производство энергии ветряной электростанцией, являются вертикальный сдвиг ветра (изменение скорости ветра по вертикальной оси) и правое вращение ветра по вертикали (изменение направления ветра по вертикальной оси).

Появляется все больше оффшорных ветроэлектростанций, и сегодня наземные лидары, работающие в режиме импульсного сканирования, могут использоваться для оценки ресурсов ветра, при которой анализ шельфовых ветров осуществляется с берега. Это позволяет сократить горизонтальную неопределенность в операциях по оценке ветровых ресурсов с гораздо меньшими затратами, чем в случае использования стандартной метеорологической мачты в открытом море. Кроме того, для валидации некоторых моделей смены ветра с морского на береговой можно использовать корреляцию ветра, измеренного с помощью сканирующего лидара.

С.1.3 **Верификация кривой мощности**

С.1.3.1 **Общая информация**

В настоящее время в стандарте 61400-12-1^[27] Международной электротехнической комиссии (МЭК) указывается, что для верификации кривой мощности ветряной турбины следует использовать метеорологическую мачту. Однако в связи с полным развитием методологии применения лидара наземного базирования для оценки ресурсов ветра стандарт МЭК 61400-12-1 претерпевает изменения и в будущем будет содержать упоминание наземного лидара для измерения вертикального профиля как средства верификации кривой мощности.

Стандарт верификации кривой мощности включает также новый метод измерения с использованием эквивалентной кривой мощности ветроколеса. В этом случае рассматривается и используется полный профиль ветра по диаметру ротора для оценки общего объема поступающего ветра на плоскости, а не только на уровне высоты оси ветровой турбины.

В дополнение к прибору для определения вертикального профиля, в случае, когда расстояние до ветряной турбины превышает $2,5D$ (где D — это диаметр ротора) свободного потока ветра ветряной турбины, сканирующий наземный лидар может также использоваться для верификации кривой мощности посредством сканирования с поверхности земли по направлению к ветряной турбине.

С.1.3.2 **Фактор потерь в работе ветроэлектростанции**

Анализируя в целом работу ветроэлектростанции, проектировщики ветроэнергетических установок используют в расчетах годового производства электроэнергии ряд коэффициентов потерь, и чем точнее эти показатели, тем основательнее проект и проще привлечь финансирование.

Наземный лидар используется в различных программах для валидации коэффициента потерь, вызванных турбулентными следами. Крупнейшие разработчики/владельцы ветряных электростанций располагают своим собственным инструментом моделирования ветрового потока, позволяющим оптимизировать конструкцию и расположение ветроэлектростанции, а наземный лидар сегодня является целесообразным средством, используемым для валидации их модели, благодаря получаемым посредством лидара данным. В рамках оптимизации работы ветряной электростанции широко используются также лидары, установленные на гондоле, в целях управления турбиной, контроля рассогласования ориентации на ветер или калибровки анемометра, установленного на гондоле.

С.2 **Мониторинг опасных ветровых явлений для целей авиационной метеорологии**

С.2.1 **Общая информация**

В настоящее время в условиях современного уровня развития и роста воздушного движения в мире осуществляется ряд проектов, направленных на модернизацию и совершенствование правил организации воздушного движения (ОрВД), таких как исследовательский проект ОрВД в Европе в рамках концепции «единого европейского воздушного пространства»^[28] и проект NextGen в Соединенных Штатах Америки. В сфере авиационной метеорологии были выделены две основные прикладные области: измерения сдвигов ветра и вихревых следов. В контексте этих двух применений когерентные доплеровские лидары считаются на сегодняшний день хорошо приспособленными и мощными датчиками для улучшения наблюдений за ветром в целях повышения безопасности и оптимизации воздушного движения.

С.2.2 **Сдвиг ветра**

Под сдвигами ветра понимают значительные изменения встречного или попутного ветра вдоль траектории взлета или захода на посадку, которые могут оказывать воздействие на воздушные суда^[29]. Эти быстрые изменения скорости воздушного потока не могут быть компенсированы за счет ускорения или замедления движения по причине действия сил инерции. Таким образом, происходят изменения в подъемной силе, силе лобового сопротивления, и, как следствие, в траектории полета. Упомянутые выше воздействия сдвига ветра являются особенно опасными, когда они происходят вблизи земли, то есть во время взлета или посадки, поскольку они могут стать причиной тяжелых авиационных происшествий. Именно поэтому со времени Чикагской конференции в стандартах Международной организации гражданской авиации (ИКАО) уделяется внимание угрозе, которую представляет сдвиг ветра для гражданского воздушного движения. Так, сдвиг ветра упоминается в Приложении 3 к Конвенции о международной гражданской авиации — *Метеорологическое обеспечение международной авиации*^[29], и подготовлено *Руководство по сдвигу ветра на малых высотах* ИКАО (Doc. 9817)^[30]. В Приложении 3 ИКАО проводится различие между двумя аспектами, касающимися сдвига ветра: оповещениями о сдвиге ветра и предупреждениями о сдвиге ветра.

- a) Оповещения о сдвиге ветра представляют собой автоматические оповещения об интенсивности сдвига ветра, зафиксированного наземными приборами дистанционного зондирования. Оповещения выпускаются, когда сдвиг ветра превышает 15 уз (7,5 м/с) применительно к изменениям встречного/попутного ветра. Как подробно изложено в ссылке [30], опасность сдвигов ветра связана главным образом с сильными горизонтальными потоками, которые вызывают резкие изменения встречного и попутного ветра, значимые для воздушных судов;
- b) предупреждения о сдвиге ветра должны содержать краткую информацию о наблюдаемых или ожидаемых сдвигах ветра, которые могут оказать неблагоприятное воздействие на воздушное судно. В них уделяется внимание условиям на высоте, не превышающей 500 м, и вдоль траекторий взлета и захода на посадку. Предупреждения составляются метеорологическим органом, отвечающим за метеорологические наблюдения в данном аэропорту. Предупреждения о сдвиге ветра готовятся «вручную» на основе всех доступных наблюдений (наземных, бортовых) и прогнозов погоды.

В соответствии с примерами передовой практики, описанными в публикации [30], когерентные доплеровские лидары представляют собой перспективное технологическое решение для обеспечения оповещений и/или предупреждений о сдвиге ветра в связи со следующим:

- a) участки, представляющие интерес, включают траектории взлета и захода на посадку, которые могут зондироваться посредством сканирующего когерентного доплеровского лидара с индикатором кругового обзора (как правило, с углом возвышения 3°), сканированием глиссады^[31] или линиями визирования вдоль глиссады;
- b) участок, зондируемый для оповещения о сдвиге ветра, охватывает две расширенные зоны в 3 морские мили от взлетно-посадочной полосы, т. е. диапазон измерений составляет как минимум 7 км. Диапазон измерений при соответствующих атмосферных условиях (описанных в разделе 5) должен составлять по меньшей мере 7 км;
- c) оповещения о сдвиге ветра составляются по трем ячейкам (в 1 морскую милю), которые образуют расширенные зоны с каждой стороны взлетно-посадочной полосы, обычно именуемые ARENA (Area Noted for Attention — контрольный участок). Для расчета разностей параметров встречного или попутного ветра требуется наличие по меньшей мере двух точек. Это соответствует расчетному требуемому разрешению, которое должно превышать 1,852 км. Однако для того, чтобы выпускать точные оповещения о сдвиге ветра и быть в состоянии выявлять все виды сдвига

ветра, особенно самые незначительные, которые представляют собой микропорывы ($> 1,5$ км), как правило, используются лидары и радиолокаторы с разрешением по дальности 200 м;

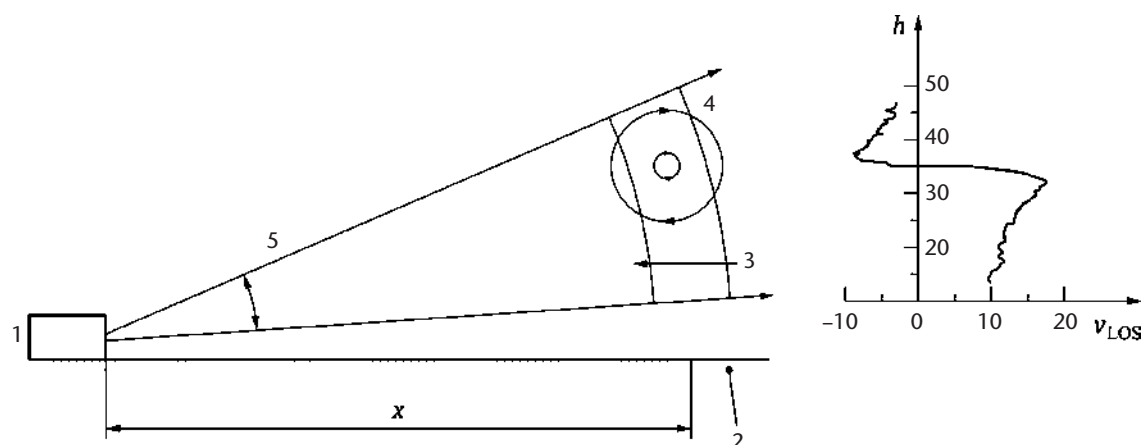
- d) в документах ИКАО указывается типичная частота оповещений, которая подходит для обнаружения сдвигов ветра. Согласно передовой мировой практике эта частота варьируется от 1 до 3 минут;
- e) очень важно отметить, что конфигурации (в частности, время накопления, скорость сканирования, частота оповещения, форма участка зондирования, дальность зондирования) оборудования, такого как лидар, предназначенного для целей обеспечения оповещений или предупреждений о сдвиге ветра, должны быть адаптированы к местным требованиям (типичные местные явления сдвига ветра и потребности пользователей, таких как авиадиспетчеры).

Более того, доплеровские лидарные системы, соответствующие требованиям, указанным в добавлении D ниже, следует рассматривать в качестве ценного дополнения к наблюдениям, производимым посредством доплеровских метеорологических радиолокаторов, поскольку они обладают дополнительными функциями, касающимися осадков. Доплеровские лидары наиболее эффективно работают в условиях ясного неба, когда доплеровский радиолокатор получает лишь слабые сигналы, и наоборот, когда осадки ограничивают наблюдения доплеровского лидара, доплеровский радиолокатор функционирует оптимально. Пример с описанием конфигурации оборудования, включая доплеровский лидар, в международном аэропорту Гонконга приводится в ссылке [31].

C.2.3 **Требования в отношении обнаружения спутных вихревых следов самолетов**

Изучение вихревых следов представляет большой интерес для лиц, занимающихся управлением воздушным движением, поскольку интенсивность вихревых следов (обычно выраженная через их циркуляцию) определяет минимальный интервал эшелонирования воздушных судов для обеспечения безопасности. Спутные вихри состоят из двух мощных горизонтальных вихревых потоков, которые тянутся от каждой из законцовок крыла. Они формируются за счет подъемной силы воздушного судна, которая приводит к возникновению потока воздуха, движущегося из-под крыла самолета вокруг законцовок в область над крылом. Спутные вихри весьма устойчивы по сравнению с турбулентностью и могут сохраняться до 3 минут при стабильных атмосферных условиях. Их циркуляция определяется весом воздушного судна, скоростью воздушного потока и размахом крыла. Размер спутных вихрей составляет порядка 20 метров, но они могут быть исключительно опасными на этапах взлета и посадки воздушного судна.

Именно поэтому с 1960-х гг. ИКАО разрабатывает правила для определения интервалов эшелонирования воздушных судов по трем категориям. С увеличением мирового объема воздушных перевозок и развитием сверхтяжелых воздушных судов появился ряд проектов, направленных на модернизацию правил управления воздушным движением, и в особенности положений, определяющих интервалы эшелонирования. Так, с 1990-х гг. были предприняты многочисленные исследования спутных вихрей с использованием вычислительных гидродинамических моделей и технологии когерентных доплеровских лидаров в целях оптимизации интервалов эшелонирования при обеспечении безопасности^{[32]: [33]}. Для измерения таких вихрей особенно подходят сканирующие когерентные доплеровские лидары, так как они позволяют производить измерения спутных вихрей, создаваемых воздушным судном на высоте менее 500 метров, с высокой разрешающей способностью (менее 10 метров) и высокой частотой (до 5 секунд) для наблюдений за их поведением вне зоны влияния земли и в условиях ее влияния. Как правило, измерения спутных вихрей проводятся вблизи взлетно-посадочных полос посредством сканирования с индикатором «дальность-высота» под острым углом (в среднем от 10 до 40°) и последующим картированием по вертикали движения спутных вихрей.



Обозначения

- 1 Лидар
- 2 Взлетно-посадочная полоса
- 3 Боковой ветер
- 4 Вихрь
- 5 Сканирование под углом

Принцип измерения для определения спутных вихревых следов воздушного судна с помощью доплеровского ветрового лидара

Лидарные измерения можно также подвергнуть последующей обработке для того, чтобы рассчитать характеристики спутных вихрей, такие как вероятность обнаружения, локализация вихревых ядер и циркуляция (интенсивность) вихрей^{[34]; [35]}.

С.2.4 Ограничения в связи с выбором места

Поскольку доплеровский лидар позволяет измерить лишь радиальную скорость ветра, размещение прибора имеет принципиально важное значение: ориентированный на взлетно-посадочную полосу вектор ветра должен иметь выраженную проекцию на линию визирования лидара. В целом величина и, следовательно, качество проекции составляющей ветра в направлении взлетно-посадочной полосы на линии визирования снижаются в соответствии с $\cos^2 \theta$, где θ — угол между направлением луча и взлетно-посадочной полосой^[6].

Другой аспект заключается в том, что в идеале следует проводить сканирование глissады с углом наклона в 3° . Наиболее целесообразным для этого представляется сканирование с одним индикатором кругового обзора в случае, если лидар расположен на пороге взлетно-посадочной полосы. Если необходимо вести наблюдение на нескольких порогах взлетно-посадочной полосы посредством одного прибора, то следование глissаде с углом наклона 3° невозможно, а описанные выше временные ограничения, как правило, не позволяют проведение сканирования с более чем одним углом возвышения. Тем не менее сканирование, производимое под углом 3° с центром в фактическом месте размещения лидара, все равно эффективнее системы оповещения о сдвиге ветра на малых высотах, в которой используются анемометры, в плане обнаружения сдвига ветра на участках глissады.

ДОБАВЛЕНИЕ D. ТИПИЧНЫЕ ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ И СООТВЕТСТВУЮЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ

(Для информации)

В соответствии с потребностями основных областей применения (см. таблицу ниже) выделяют три класса точности для измерения скорости ветра. Эти классы определяются в зависимости от конкретного пространственного и временного разрешения. Требования к точности измерений скорости ветра должны соблюдаться во всех областях применения.

- а) Класс А: $x \leq 0,1$ м/с (например, для целей ветроэнергетики);
- б) класс В: $0,1 < x \leq 0,5$ м/с (например, для метеорологических применений)^[13];
- с) класс С: $0,5 < x \leq 1,0$ м/с (например, для прогнозов текущей погоды)^[13].

Типичные области применения и соответствующие требования

Применение	Требуемый параметр	Ссылка	Типичная дальность зондирования (м)	Разрешение по дальности (м)	Разрешение по времени (мин)	Точность измерения скорости (м/с)	Точность измерения направления ветра (°)	Минимальная доступность данных (%)
Картирование радиальной скорости	Радиальная скорость по линии визирования	Формула 5.B.5	200—10 000	25—100	1—10	0,5	Неприменимо	50—99 ^a
Энергия ветра: например, оценка участка, кривая мощности, профиль ветра	Профиль горизонтального вектора ветра вдоль вертикальной оси	Например, [36]	40—200	25	10	0,5	2	85
Численный прогноз погоды с высоким разрешением	Профиль горизонтального вектора ветра вдоль вертикальной оси	[13]	> 50	25	10	0,5	2	80
Загрязнение воздуха: например, моделирование дисперсии, менеджмент рисков	Профиль горизонтального вектора ветра вдоль вертикальной оси	—	40—200	25	10	0,5	—	90

Применение	Требуемый параметр	Ссылка	Типичная дальность зондирования (м)	Разрешение по дальности (м)	Разрешение по времени (мин)	Точность измерения скорости (м/с)	Точность измерения направления ветра (°)	Минимальная доступность данных (%)
Авиация: сдвиг ветра	Радиальная составляющая ветра вдоль траектории взлета, захода на посадку и взлетно-посадочной полосы (ВПП)	[29]; [36]	7 000—8 000 (5 500 + 1/2 ВПП)	200	1	0,5	5	80
Авиация: мониторинг вихрей (наземные системы)	Радиальная скорость ветра на плоскостях, перпендикулярных ВПП	—	Расстояние до ВПП + 300—500 с каждой стороны	25 (5 с наложением)	0,1	1	—	< 50
Метеорологические применения: например, прогноз текущей погоды	Профиль горизонтального вектора ветра вдоль вертикальной оси	[13]	0—4 000	100	15	1	5	80

а В зависимости от области применения.

БИБЛИОГРАФИЯ

- [1] Henderson, S. W.; Gatt, P.; Rees, D. et al. Wind Lidar. In *Laser Remote Sensing*; Fujii, T.; Fukuchi, T., Eds.; CRC Press: Boca Raton, USA, 2005. <https://doi.org/10.1201/9781420030754>.
- [2] Measures, R. M. *Laser Remote Sensing: Fundamentals and Applications*. Krieger Publishing: 1992.
- [3] Frehlich, R. G.; Kavaya, M. J. Coherent Laser Radar Performance for General Atmospheric Refractive Turbulence. *Applied Optics* **1991**, 30 (36), 5325–5352. <https://doi.org/10.1364/AO.30.005325>.
- [4] Belmonte, A. Analyzing the Efficiency of a Practical Heterodyne Lidar in the Turbulent Atmosphere: Telescope Parameters. *Optics Express* **2003**, 11 (17), 2041–2046. <https://doi.org/10.1364/OE.11.002041>.
- [5] Frehlich, R.; Hannon, S. M.; Henderson, S. W. Coherent Doppler Lidar Measurements of Winds in the Weak Signal Regime. *Applied Optics* **1997**, 36 (15), 3491–3499. <https://doi.org/10.1364/AO.36.003491>.
- [6] Banakh, V. A.; Smalikho, I. N. Estimation of the Turbulence Energy Dissipation Rate from the Pulsed Doppler Lidar Data. *Atmospheric and Oceanic Optics* **1997**, 10 (12).
- [7] Frehlich, R. Simulation of Coherent Doppler Lidar Performance in the Weak-Signal Regime. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* **1996**, 13 (3), 646–658. [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(1996\)013<0646:SOCCLP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(1996)013<0646:SOCCLP>2.0.CO;2).
- [8] Dabas, A. M.; Drobinski, P.; Flamant, P. H. Velocity Biases of Adaptive Filter Estimates in Heterodyne Doppler Lidar Measurements. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* **2000**, 17 (9), 1189–1202. [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(2000\)017<1189:VBOAFE>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(2000)017<1189:VBOAFE>2.0.CO;2).
- [9] Dabas, A. Semiempirical Model for the Reliability of a Matched Filter Frequency Estimator for Doppler Lidar. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* **1999**, 16 (1), 19–28. [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(1999\)016<0019:SMFTRO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(1999)016<0019:SMFTRO>2.0.CO;2).
- [10] Goodman, J. W. Statistical Properties of Laser Speckle Patterns. In *Laser Speckle and Related Phenomena*; Dainty, J. C., Ed.; Topics in Applied Physics; Springer: Berlin, Heidelberg, 1975; 9–75. https://doi.org/10.1007/978-3-662-43205-1_2.
- [11] American National Standards Institute; Laser Institute of America. *American National Standard for Safe Use of Lasers; ANSI Z136.1 – 2014*; Laser Institute of America: Orlando, USA, 2007.
- [12] International Electrotechnical Commission (IEC). *Safety of Laser Products – Part 1: Equipment Classification and Requirement*; IEC 60825-1:2014; 2014. <https://webstore.iec.ch/publication/3587>.
- [13] World Meteorological Organization (WMO). OSCAR: List of all Requirements. <https://space.oscar.wmo.int/requirements>.
- [14] Boquet, M.; Royer, P.; Cariou, J.-P. et al. Simulation of Doppler Lidar Measurement Range and Data Availability. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* **2016**, 33 (5), 977–987. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-15-00571>.
- [15] Frehlich, R. Estimation of Velocity Error for Doppler Lidar Measurements. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* **2001**, 18 (1), 1628–1639. [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(2001\)018<1628:EOVEFD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(2001)018<1628:EOVEFD>2.0.CO;2).
- [16] Ernsdorf, T.; Stiller, B.; Beckmann, B. et al. Inter-comparison of X-band Radar and Lidar Low-level Wind Measurement for Air Traffic Control (ATC). In *Proceedings of the Eighth European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology*, Garmisch-Partenkirchen, Germany 1–5 September 2014; Institute of Atmospheric Physics, German Aerospace Center, 2014. https://www.pa.op.dlr.de/erad2014/programme/ShortAbstracts/056_short.pdf.
- [17] Hannesen, R.; Kauczok, S.; Weipert, A. Quality of Clear-Air Radar Radial Velocity Data: Do Insects Matter? In *Proceedings of the Eighth European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology*, Garmisch-Partenkirchen, Germany 1–5 September 2014; Institute of Atmospheric Physics, German Aerospace Center, 2014. https://www.pa.op.dlr.de/erad2014/programme/ExtendedAbstracts/055_Hannesen.pdf.
- [18] Weipert, A.; Kauczok, S.; Hannesen, R. et al. Wind Shear Detection Using Radar and Lidar at Frankfurt and Munich Airports. In *Proceedings of the Eighth European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology*, Garmisch-Partenkirchen, Germany 1–5 September 2014; Institute of Atmospheric Physics, German Aerospace Center, 2014. https://www.pa.op.dlr.de/erad2014/programme/ExtendedAbstracts/058_Weipert.pdf.
- [19] Jørgensen, H. E.; Mikkelsen, T.; Streicher, J. et al. Lidar Calibration Experiments. *Applied Physics B* **1997**, 64 (3), 355–361. <https://doi.org/10.1007/s003400050184>.
- [20] Bronštejn, I. N.; Semendjaev, K. A.; Musiol, G. et al. *Taschenbuch der Mathematik*; Deutsch, 2008. <https://katalog.ub.uni-heidelberg.de/titel/66682087>.

- [21] Fukao, S.; Hamazu, K. *Radar for Meteorological and Atmospheric Observations*; Springer Japan: Tokyo, 2014. <https://doi.org/10.1007/978-4-431-54334-3>.
- [22] Banakh, V.; Smalikho, I. *Coherent Doppler Wind Lidars in a Turbulent Atmosphere*; Artech House: Boston, 2013. <https://www.biblio.com/book/coherent-doppler-wind-lidars-turbulent-atmosphere/d/1389769517>.
- [23] Rao, I. S.; Anandan, V. K.; Reddy, P. N. Evaluation of DBS Wind Measurement Technique in Different Beam Configurations for a VHF Wind Profiler. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* **2008**, 25 (12), 2304–2312. <https://doi.org/10.1175/2008JTECHA1113.1>.
- [24] Lhermitte, R. M. Note on Wind Variability with Doppler Radar. *Journal of the Atmospheric Sciences* **1962**, 19 (4), 343–346. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1962\)019<0343:NOWVWD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1962)019<0343:NOWVWD>2.0.CO;2).
- [25] Browning, K. A.; Wexler, R. The Determination of Kinematic Properties of a Wind Field Using Doppler Radar. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* **1968**, 7 (1), 105–113. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1968\)007<0105:TDOKPO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1968)007<0105:TDOKPO>2.0.CO;2).
- [26] Waldteufel, P.; Corbin, H. On the Analysis of Single-Doppler Radar Data. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* **1979**, 18 (4), 532–542. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1979\)018<0532:OTAOSD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1979)018<0532:OTAOSD>2.0.CO;2).
- [27] International Electrotechnical Commission (IEC). *Wind Turbines – Part 12-1: Power Performance Measurements of Electricity Producing Wind Turbines*; IEC 61400-12-1:2005; 2005. <https://webstore.iec.ch/publication/5429#additionalinfo>.
- [28] SESAR Joint Undertaking. *European Air Traffic Management Master Plan*. <https://www.sesarju.eu/news-press/documents/european-atm-master-plan--446>.
- [29] International Civil Aviation Organization (ICAO). *Meteorological Service for International Air Navigation*; Annex 3 to the Convention on International Civil Aviation; ICAO: Montreal, 2007. <https://www.icao.int/airnavigation/IMP/Documents/Annex%203%20-%2075.pdf>.
- [30] International Civil Aviation Organization (ICAO). *Manual on Low-Level Wind Shear*; Doc 9817 AN/449; ICAO: Montreal, 2005. <https://www.skybrary.aero/sites/default/files/bookshelf/2194.pdf>.
- [31] Shun, C. M.; Chan, P. W. Applications of an Infrared Doppler Lidar in Detection of Wind Shear. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* **2008**, 25 (5), 637–655. <https://doi.org/10.1175/2007JTECHA1057.1>.
- [32] Wakenet-EU. <http://www.wakenet.eu/>.
- [33] Lang, S. and W. Bryant. *Vortex Research in the USA (WakeNet-USA)*. Air Traffic Organization, Federal Aviation Administration: 2006.
- [34] Holzäpfel, F.; Gerz, T.; Köpp, F. et al. Strategies for Circulation Evaluation of Aircraft Wake Vortices Measured by Lidar. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* **2003**, 20 (8), 1183–1195. [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(2003\)020<1183:SFCEOA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(2003)020<1183:SFCEOA>2.0.CO;2).
- [35] Dolfi-Bouteyre, A.; Augere, B.; Valla, M. et al. *1,55 μ m Pulsed Fibre Lidar for Wake Vortex Detection (Axial or Transverse)*; Wakenet-EU Workshop, 2009.
- [36] Hasager, C. B.; Stein, D.; Courtney, M. et al. Hub Height Ocean Winds over the North Sea Observed by the NORSEWInD Lidar Array: Measuring Techniques, Quality Control and Data Management. *Remote Sensing* 2013, 5 (9), 4280–4303. <https://doi.org/10.3390/rs5094280>.
- [37] International Organization for Standardization (ISO). *Air Quality – Environmental Meteorology – Part 1: Ground-based Remote Sensing of Visual Range by Lidar*; ISO 28902-1:2012. <https://www.iso.org/standard/45022.html>.
- [38] International Organization for Standardization (ISO). *Air Quality – Environmental Meteorology – Part 3: Ground-based Remote Sensing of Wind by Continuous-wave Doppler Lidar*; ISO 28902-3:2018. <https://www.iso.org/standard/71592.html>.
-

СПРАВОЧНАЯ И ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

- Adachi, A.; Kobayashi, T.; Gage, K. S. et al. Evaluation of Three-Beam and Four-Beam Profiler Wind Measurement Techniques Using a Five-Beam Wind Profiler and Collocated Meteorological Tower. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* **2005**, 22 (8), 1167–1180. <https://doi.org/10.1175/JTECH1777.1>.
- Angevine, W. M.; Ecklund, W. L.; Carter, D. A. et al. Improved Radio Acoustic Sounding Techniques. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* **1994**, 11 (1), 42–49. [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(1994\)011<0042:IRAST>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(1994)011<0042:IRAST>2.0.CO;2).
- Bevis, M.; Businger, S.; Chiswell, S. et al. GPS Meteorology: Mapping Zenith Wet Delays onto Precipitable Water. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* **1994**, 33 (3), 379–386. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1994\)033<0379:GMMZWD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1994)033<0379:GMMZWD>2.0.CO;2).
- Bianco, L.; Cimini, D.; Marzano, F. S. et al. Combining Microwave Radiometer and Wind Profiler Radar Measurements for High-Resolution Atmospheric Humidity Profiling. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* **2005**, 22 (7), 949–965. <https://doi.org/10.1175/JTECH1771.1>.
- Bianco, L.; Gottas, D.; Wilczak, J. M. Implementation of a Gabor Transform Data Quality-Control Algorithm for UHF Wind Profiling Radars. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* **2013**, 30 (12), 2697–2703. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-13-00089.1>.
- Bianco, L.; Friedrich, K.; Wilczak, J. M. et al. Assessing the Accuracy of Microwave Radiometers and Radio Acoustic Sounding Systems for Wind Energy Applications. *Atmospheric Measurement Techniques* **2017**, 10 (5), 1707–1721. <https://doi.org/10.5194/amt-10-1707-2017>.
- Blumberg, W. G.; Turner, D. D.; Löhnert, U. et al. Ground-Based Temperature and Humidity Profiling Using Spectral Infrared and Microwave Observations. Part II: Actual Retrieval Performance in Clear-Sky and Cloudy Conditions. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* **2015**, 54 (11), 2305–2319. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-15-0005.1>.
- Boudouris, G. On the Index of Refraction of Air, the Absorption and Dispersion of Centimeter waves by Gases. *Journal of Research of the National Bureau of Standards, Section D: Radio Propagation* **1963**, 67D (6), 631. <https://doi.org/10.6028/jres.067D.069>.
- Bradley, S. *Atmospheric Acoustic Remote Sensing: Principles and Applications*; CRC Press: Boca Raton, 2007. <https://doi.org/10.1201/9781420005288>.
- Brown, E. H.; Hall Jr., F. F. Advances in Atmospheric Acoustics. *Reviews of Geophysics* **1978**, 16 (1), 47–110. <https://doi.org/10.1029/RG016i001p00047>.
- Cadeddu, M. P.; Peckham, G. E.; Gaffard, C. The Vertical Resolution of Ground-Based Microwave Radiometers Analyzed through a Multiresolution Wavelet Technique. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* **2002**, 40 (3), 531–540. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2002.1000313>.
- Cadeddu, M. P.; Liljegren, J. C.; Turner, D. D. The Atmospheric Radiation Measurement (ARM) Program Network of Microwave Radiometers: Instrumentation, Data, and Retrievals. *Atmospheric Measurement Techniques* **2013**, 6 (9), 2359–2372. <https://doi.org/10.5194/amt-6-2359-2013>.
- Candlish, L. M.; Raddatz, R. L.; Asplin, M. G. et al. Atmospheric Temperature and Absolute Humidity Profiles over the Beaufort Sea and Amundsen Gulf from a Microwave Radiometer. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* **2012**, 29 (9), 1182–1201. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-10-05050.1>.
- Caumont, O.; Cimini, D.; Löhnert, U. et al. Assimilation of Humidity and Temperature Observations Retrieved from Ground-Based Microwave Radiometers into a Convective-Scale NWP Model. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **2016**, 142 (700), 2692–2704. <https://doi.org/10.1002/qj.2860>.
- Chan, P. W. Performance and Application of a Multi-Wavelength, Ground-Based Microwave Radiometer in Intense Convective Weather. *Meteorologische Zeitschrift* **2009**, 18, 253–265. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2009/0375>.
- Chan, P. W.; Lee, Y. F. Application of Brightness Temperature Data from a Ground-Based Microwave Radiometer to Issue Low-Level Windshear Alert over Hong Kong International Airport. *MAUSAM* **2013**, 64 (3), 457–466. <https://doi.org/10.54302/mausam.v64i3.727>.
- Chan, W. S.; Lee, J. C. W. Vertical Profile Retrievals with Warm-Rain Microphysics Using the Ground-Based Microwave Radiometer Operated by the Hong Kong Observatory. *Atmospheric Research* **2015**, 161–162, 125–133. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2015.04.007>.
- Chakraborty, R.; Das, S.; Maitra, A. Prediction of Convective Events Using Multi-Frequency Radiometric Observations at Kolkata. *Atmospheric Research* **2016**, 169, 24–31. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2015.09.024>.

- Cimini, D.; Hewison, T. J.; Martin, L. et al. Temperature and Humidity Profile Retrievals from Ground-Based Microwave Radiometers during TUC. *Meteorologische Zeitschrift* **2006**, 45–56. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2006/0099>.
- Cimini, D.; De Angelis, F.; Dupont, J.-C. et al. Mixing Layer Height Retrievals by Multichannel Microwave Radiometer Observations. *Atmospheric Measurement Techniques* **2013**, 6 (11), 2941–2951. <https://doi.org/10.5194/amt-6-2941-2013>.
- Cimini, D.; Nelson, M.; Güldner, J. et al. Forecast Indices from a Ground-Based Microwave Radiometer for Operational Meteorology. *Atmospheric Measurement Techniques* **2015**, 8 (1), 315–333. <https://doi.org/10.5194/amt-8-315-2015>.
- Cimini, D.; Rosenkranz, P. W.; Tretyakov, M. Y. et al. Uncertainty of Atmospheric Microwave Absorption Model: Impact on Ground-Based Radiometer Simulations and Retrievals. *Atmospheric Chemistry and Physics* **2018**, 18 (20), 15231–15259. <https://doi.org/10.5194/acp-18-15231-2018>.
- Cimini, D.; Hocking, J.; De Angelis, F. et al. RTTOV-Gb v1.0 – Updates on Sensors, Absorption Models, Uncertainty, and Availability. *Geoscientific Model Development* **2019**, 12 (5), 1833–1845. <https://doi.org/10.5194/gmd-12-1833-2019>.
- Cimini, D.; Haeffelin, M.; Kotthaus, S. et al. Towards the Profiling of the Atmospheric Boundary Layer at European Scale –Introducing the COST Action PROBE. *Bulletin of Atmospheric Science and Technology* **2020**, 1 (1), 23–42. <https://doi.org/10.1007/s42865-020-00003-8>.
- Collaud Coen, M.; Praz, C.; Haefele, A. et al. Determination and Climatology of the Planetary Boundary Layer Height above the Swiss Plateau by in Situ and Remote Sensing Measurements as Well as by the COSMO-2 Model. *Atmospheric Chemistry and Physics* **2014**, 14 (23), 13205–13221. <https://doi.org/10.5194/acp-14-13205-2014>.
- Davis, J. L.; Herring, T. A.; Shapiro, I. I. et al. Geodesy by Radio Interferometry: Effects of Atmospheric Modeling Errors on Estimates of Baseline Length. *Radio Science* **1985**, 20 (6), 1593–1607. <https://doi.org/10.1029/RS020i006p01593>.
- De Angelis, F.; Cimini, D.; Hocking, J. et al. RTTOV-Gb – Adapting the Fast Radiative Transfer Model RTTOV for the Assimilation of Ground-Based Microwave Radiometer Observations. *Geoscientific Model Development* **2016**, 9 (8), 2721–2739. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-2721-2016>.
- De Angelis, F.; Cimini, D.; Löhnert, U. et al. Long-Term Observations Minus Background Monitoring of Ground-Based Brightness Temperatures from a Microwave Radiometer Network. *Atmospheric Measurement Techniques* **2017**, 10 (10), 3947–3961. <https://doi.org/10.5194/amt-10-3947-2017>.
- de Haan, S. *National/Regional Operational Procedures of GPS Water Vapour Networks and Agreed International Procedures* (WMO/TD-No. 1340). Instruments and Observing Methods Report No. 92; World Meteorological Organization (WMO): Geneva, 2006.
- Derr, V. E. *Remote Sensing of the Troposphere*. U.S. National Oceanic and Atmospheric Administration; US Government Printing Office: Washington, DC, USA, 1972. <http://archive.org/details/remotesensingoft00derr>.
- Djalalova, I. V.; Turner, D. D.; Bianco, L. et al. Improving Thermodynamic Profile Retrievals from Microwave Radiometers by Including Radio Acoustic Sounding System (RASS) Observations. *Atmospheric Measurement Techniques* **2022**, 15 (2), 521–537. <https://doi.org/10.5194/amt-15-521-2022>.
- Dolman, B. K.; Reid, I. M. Bias Correction and Overall Performance of a VHF Spaced Antenna Boundary Layer Profiler for Operational Weather Forecasting. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* **2014**, 118, 16–24. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2014.02.009>.
- Doviak, R.; Zrnić, D. *Doppler Radar & Weather Observations*; Academic Press, 2014. <https://www.everand.com/book/652898746/Doppler-Radar-Weather-Observations>.
- Elgered, G.; Plag, H.-P.; Barlag, S. et al. *COST 716 Exploitation of Ground-Based GPS for Operational Numerical Weather Prediction and Climate Applications – Final Report*; European Union: 2004.
- Fernández-González, S.; Valero, F.; Sanchez, J. L. et al. Observation of a Freezing Drizzle Episode: A Case Study. *Atmospheric Research* **2014**, 149, 244–254. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2014.06.014>.
- Foken, T., Ed. *Springer Handbook of Atmospheric Measurements*; Springer: Cham, Switzerland, 2021.
- Foth, A.; Pospichal, B. Optimal Estimation of Water Vapour Profiles Using a Combination of Raman Lidar and Microwave Radiometer. *Atmospheric Measurement Techniques* **2017**, 10 (9), 3325–3344. <https://doi.org/10.5194/amt-10-3325-2017>.
- Fukao, S.; Hamazu, K. *Radar for Meteorological and Atmospheric Observations*; Springer Japan: Tokyo, 2014. <https://doi.org/10.1007/978-4-431-54334-3>.
- Gaffard, C.; Hewison, T. *Radiometrics MP3000 Microwave Radiometer Trial Report*. Met Office: Wokingham, United Kingdom, 2003. https://www.researchgate.net/publication/255598823_Radiometrics_MP3000_Microwave_Radiometer_Trial_Report.

- Gaynor, J. E.; Baker, C. B.; Kaimal, J. C. The International Sodar Intercomparison Experiment. In *Proceedings of the Fifth International Symposium on Acoustic Remote Sensing*, McGraw-Hill, New York, 1990; 67–74.
- Gossard, E. E.; Strauch, R. G. *Radar Observations of Clear Air and Clouds*. Elsevier, Scientific Publishing: Amsterdam, 1983.
- Güldner, J.; Spänkuch, D. Remote Sensing of the Thermodynamic State of the Atmospheric Boundary Layer by Ground-Based Microwave Radiometry. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* **2001**, 18 (6), 925–933. [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(2001\)018<0925:RSOTTS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(2001)018<0925:RSOTTS>2.0.CO;2).
- Han, Y.; Westwater, E. R.; Ferrare, R. A. Applications of Kalman Filtering to Derive Water Vapor Profiles from Raman Lidar and Microwave Radiometers. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* **1997**, 14 (3), 480–487. [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(1997\)014<0480:AOKFTD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(1997)014<0480:AOKFTD>2.0.CO;2).
- Hasegawa, S.; Stokesberry, D. P. Automatic Digital Microwave Hygrometer. *Review of Scientific Instruments* **2008**, 46 (7), 867–873. <https://doi.org/10.1063/1.1134331>.
- Heise, S.; Dick, G.; Gendt, G. et al. Integrated Water Vapor from IGS Ground-Based GPS Observations: Initial Results from a Global 5-Min Data Set. *Annales Geophysicae* **2009**, 27 (7), 2851–2859. <https://doi.org/10.5194/angeo-27-2851-2009>.
- Hocking, W. K. A Review of Mesosphere–Stratosphere–Troposphere (MST) Radar Developments and Studies, circa 1997–2008. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* **2011**, 73 (9), 848–882. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2010.12.009>.
- Hocking, W. K.; Röttger, J.; Palmer, R. D. et al. *Atmospheric Radar: Application and Science of MST Radars in the Earth's Mesosphere, Stratosphere, Troposphere, and Weakly Ionized Regions*; Cambridge University Press: Cambridge, 2016. <https://doi.org/10.1017/9781316556115>.
- Hogg, D. C.; Decker, M. T.; Guiraud, F. O. et al. An Automatic Profiler of the Temperature, Wind and Humidity in the Troposphere. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* **1983**, 22 (5), 807–831. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1983\)022<0807:AAPOTT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1983)022<0807:AAPOTT>2.0.CO;2).
- Illingworth, A. J.; Cimini, D.; Gaffard, C. et al. Exploiting Existing Ground-Based Remote Sensing Networks to Improve High-Resolution Weather Forecasts. *Bulletin of the American Meteorological Society* **2015**, 96 (12), 2107–2125. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-13-00283.1>.
- International Telecommunication Union (ITU). *Radio Regulations*, Volume III, 2020 ed.; Resolution 217; ITU: Geneva, 2020. <https://www.itu.int/pub/R-REG-RR-2020>.
- Kadyrov, E. N. *Operational Aspects of Different Ground-Based Remote Sensing Observing Techniques for Vertical Profiling of Temperature, Wind, Humidity and Cloud Structure: A Review* (WMO/TD-No. 1309). Instruments and Observing Methods Report No. 89; World Meteorological Organization (WMO): Geneva, 2006.
- Kadyrov, E. N.; Miller, E. A.; Troitsky, A. V. Study of Atmospheric Boundary Layer Thermodynamics During Total Solar Eclipses. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* **2013**, 51 (9), 4672–4677. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2013.2248014>.
- Kadyrov, E. N.; Pick, D. R. The Potential for Temperature Retrieval from an Angular-Scanning Single-Channel Microwave Radiometer and Some Comparisons with in Situ Observations. *Meteorological Applications* **1998**, 5 (4), 393–404. <https://doi.org/10.1017/S1350482798001054>.
- Kadyrov, E. N.; Shur, G. N.; Viazankin, A. S. Investigation of Atmospheric Boundary Layer Temperature, Turbulence, and Wind Parameters on the Basis of Passive Microwave Remote Sensing. *Radio Science* **2003**, 38 (3). <https://doi.org/10.1029/2002RS002647>.
- Küchler, N.; Turner, D. D.; Lohnert, U. et al. Calibrating Ground-Based Microwave Radiometers: Uncertainty and Drifts. *Radio Science* **2016**, 51 (4), 311–327. <https://doi.org/10.1002/2015RS005826>.
- Lataitis, R. J. Signal Power for Radio Acoustic Sounding of Temperature: The Effects of Horizontal Winds, Turbulence, and Vertical Temperature Gradients. *Radio Science* **1992a**, 27 (3), 369–385. <https://doi.org/10.1029/92RS00004>.
- Lataitis, R. J. *Theory and Application of a Radio-acoustic Sounding System*; NOAA Technical Memorandum ERL WPL-230; National Oceanic and Atmospheric Administration, 1992b. <https://repository.library.noaa.gov/view/noaa/32558>.
- Leblanc, T.; Chouza, F.; Taha, G. et al. A 25-year High in Global Stratospheric Aerosol Loading [in State of the Climate in 2019]. *Bulletin of the American Meteorological Society* **2020** 101 (8), S88–S89. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-20-0104.1>.
- Liljegren, J. C.; Boukabara, S.-A.; Cady-Pereira, K. et al. The Effect of the Half-Width of the 22-GHz Water Vapor Line on Retrievals of Temperature and Water Vapor Profiles with a 12-Channel Microwave Radiometer. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* **2005**, 43 (5), 1102–1108. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2004.839593>.

- Löhnert, U.; Turner, D. D.; Crewell, S. Ground-Based Temperature and Humidity Profiling Using Spectral Infrared and Microwave Observations. Part I: Simulated Retrieval Performance in Clear-Sky Conditions. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* **2009**, 48 (5), 1017–1032. <https://doi.org/10.1175/2008JAMC2060.1>.
- Löhnert, U.; Maier, O. Operational Profiling of Temperature Using Ground-Based Microwave Radiometry at Payerne: Prospects and Challenges. *Atmospheric Measurement Techniques* **2012**, 5 (5), 1121–1134. <https://doi.org/10.5194/amt-5-1121-2012>.
- Madhulatha, A.; Rajeevan, M.; Venkat Ratnam, M. et al. Nowcasting Severe Convective Activity over Southeast India Using Ground-Based Microwave Radiometer Observations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* **2013**, 118 (1), 1–13. <https://doi.org/10.1029/2012JD018174>.
- Martinet, P.; Cimini, D.; De Angelis, F. et al. Combining Ground-Based Microwave Radiometer and the AROME Convective Scale Model through 1DVAR Retrievals in Complex Terrain: An Alpine Valley Case Study. *Atmospheric Measurement Techniques* **2017**, 10 (9), 3385–3402. <https://doi.org/10.5194/amt-10-3385-2017>.
- Martinet, P.; Cimini, D.; Burnet, F. et al. Improvement of Numerical Weather Prediction Model Analysis during Fog Conditions through the Assimilation of Ground-Based Microwave Radiometer Observations: A 1D-Var Study. *Atmospheric Measurement Techniques* **2020**, 13 (12), 6593–6611. <https://doi.org/10.5194/amt-13-6593-2020>.
- Martner, B. E.; Wuertz, D. B.; Stankov, B. B. et al. An Evaluation of Wind Profiler, RASS, and Microwave Radiometer Performance. *Bulletin of the American Meteorological Society* **1993**, 74 (4), 599–614. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1993\)074<0599:AEOWPR>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1993)074<0599:AEOWPR>2.0.CO;2).
- Maschwitz, G.; Löhnert, U.; Crewell, S. et al. Investigation of Ground-Based Microwave Radiometer Calibration Techniques at 530 hPa. *Atmospheric Measurement Techniques* **2013**, 6 (10), 2641–2658. <https://doi.org/10.5194/amt-6-2641-2013>.
- May, P. T.; Strauch, R. G.; Moran, K. P. et al. Temperature Sounding by RASS with Wind Profiler Radars: A Preliminary Study. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* **1990**, 28 (1), 19–28. <https://doi.org/10.1109/36.45742>.
- Measures, R. M. *Laser Remote Sensing: Fundamentals and Applications*. Wiley-Interscience: New York, 1984.
- Min, J.-S.; Park, M.-S.; Chae, J.-H. et al. Integrated System for Atmospheric Boundary Layer Height Estimation (ISABLE) Using a Ceilometer and Microwave Radiometer. *Atmospheric Measurement Techniques* **2020**, 13 (12), 6965–6987. <https://doi.org/10.5194/amt-13-6965-2020>.
- Muschinski, A.; Lehmann, V.; Justen, L. et al. Advanced Radar Wind Profiling. *Meteorologische Zeitschrift* **2005**, 14 (5), 609–625. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2005/0067>.
- Navas-Guzman, F.; Stahli, O.; Kampf, N. Study of Cloud Effect on the Tropospheric Temperature Retrievals. In *URSI Commission F Microwave Signatures 2013: Specialist Symposium on Microwave Remote Sensing of the Earth, Oceans, and Atmosphere*, Espoo, Finland, 28–31 October 2013; Praks, J.; Hallikainen, M.; Kainulainen, J. et al., Eds.; Aalto University: Espoo, Finland, 2013; 136.
- Neff, W. D.; Coulter, R. L. Acoustic Remote Sensing. In *Probing the Atmospheric Boundary Layer*; Lenschow, D. H., Ed.; American Meteorological Society: Boston, 1986; 201–239. https://doi.org/10.1007/978-1-944970-14-7_13.
- Neisser, J.; Görsdorf, V.; Steinhagen, H. Comparison of Windprofiler and Rawinsonde Measurements. Presented at the WMO Technical Conference on Instruments and Methods of Observation (TECO-94), Geneva, 28 February–2 March 1994. In *Papers Presented at the WMO Technical Conference on Instruments and Methods of Observation (TECO-94)* (WMO/TD-No. 588). Instruments and Observing Methods Report No. 57; World Meteorological Organization (WMO): Geneva, 1994.
- Ning, T.; Wang, J.; Elgered, G. et al. The Uncertainty of the Atmospheric Integrated Water Vapour Estimated from GNSS Observations. *Atmospheric Measurement Techniques* **2016**, 9 (1), 79–92. <https://doi.org/10.5194/amt-9-79-2016>.
- Panofsky, H. A. Tower Micrometeorology. In: *Workshop on Micrometeorology*; Haugen, D. A., Ed.; American Meteorological Society: Boston, 1973.
- Park, M.-S.; Park, S.-H.; Chae, J.-H. et al. High-Resolution Urban Observation Network for User-Specific Meteorological Information Service in the Seoul Metropolitan Area, South Korea. *Atmospheric Measurement Techniques* **2017**, 10 (4), 1575–1594. <https://doi.org/10.5194/amt-10-1575-2017>.
- Ricaud, P.; Genthon, C.; Durand, P. et al. Summer to Winter Diurnal Variabilities of Temperature and Water Vapour in the Lowermost Troposphere as Observed by HAMSTRAD over Dome C, Antarctica. *Boundary-Layer Meteorology* **2012**, 143 (1), 227–259. <https://doi.org/10.1007/s10546-011-9673-6>.

- Rüfenacht, R.; Haefele, A.; Pospichal, B. et al. EUMETNET Opens to Microwave Radiometers for Operational Thermodynamical Profiling in Europe. *Bulletin of Atmospheric Science and Technology* **2021**, 2. <https://doi.org/10.1007/s42865-021-00033-w>.
- Saastamoinen, J. Atmospheric Correction for the Troposphere and Stratosphere in Radio Ranging Satellites. In *The Use of Artificial Satellites for Geodesy*; Henriksen, S. W.; Mancini, A.; Chovitz, B. H., Eds.; American Geophysical Union (AGU): Washington, DC, USA, 1972; 247–251. <https://doi.org/10.1029/GM015p0247>.
- Sassen, K. The Polarization Lidar Technique for Cloud Research: A Review and Current Assessment. *Bulletin of the American Meteorological Society* **1991**, 72 (12), 1848–1866. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1991\)072<1848:PLTFC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1991)072<1848:PLTFC>2.0.CO;2).
- Sassen, K. Polarization in Lidar. In *Lidar: Range-Resolved Optical Remote Sensing of the Atmosphere*; Weitkamp, C., Ed.; Springer Series in Optical Sciences; Springer: New York, 2005; 19–42. https://doi.org/10.1007/0-387-25101-4_2.
- Singal, S. P. Current Status of Air Quality Related Boundary Layer Meteorological Studies Using Sodar. In *Acoustic Remote Sensing: Proceedings of the Fifth International Symposium on Acoustic Remote Sensing of the Atmosphere and Oceans, 6–9 February 1990, New Delhi*; Tata McGraw-Hill Publishing Company: New Delhi, 1990; 453–476.
- Smith, E.; Weintraub, S. The Constants in the Equation for Atmospheric Refractive Index at Radio Frequencies. *Proceedings of the IRE* **1953**, 41 (8), 1035–1037. <https://doi.org/10.1109/JRPROC.1953.274297>.
- Solheim, F.; Godwin, J. R.; Westwater, E. R. et al. Radiometric Profiling of Temperature, Water Vapor and Cloud Liquid Water Using Various Inversion Methods. *Radio Science* **1998**, 33 (2), 393–404. <https://doi.org/10.1029/97RS03656>.
- Syed, I.; Browell, E. V. Recent Lidar Technology Developments and Their Influence on Measurements of Tropospheric Water Vapor. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* **1994**, 11 (1, pt). [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(1994\)011<0076:RLTDAT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(1994)011<0076:RLTDAT>2.0.CO;2).
- Teschke, G.; Lehmann, V. Mean Wind Vector Estimation Using the Velocity–Azimuth Display (VAD) Method: An Explicit Algebraic Solution. *Atmospheric Measurement Techniques* **2017**, 10 (9), 3265–3271. <https://doi.org/10.5194/amt-10-3265-2017>.
- Thayer, G. D. An Improved Equation for the Radio Refractive Index of Air. *Radio Science* **1974**, 9 (10), 803–807. <https://doi.org/10.1029/RS009i010p00803>.
- Thompson, N. Tethered Balloons. In *Air-sea Interaction: Instruments and Methods*; Dobson, F.; Hasse L.; Davis, R., Eds.; Plenum Press: New York, 1980. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-9182-5_32.
- Thompson, A. R.; Moran, J. M.; Swenson, G. W. *Interferometry and Synthesis in Radio Astronomy*; John Wiley and Sons: New York, 1986.
- Turner, D. D.; Löhnert, U. Ground-Based Temperature and Humidity Profiling: Combining Active and Passive Remote Sensors. *Atmospheric Measurement Techniques* **2021**, 14 (4), 3033–3048. <https://doi.org/10.5194/amt-14-3033-2021>.
- Van Gyseghem, A. O. *Indirect Sensing: Meteorological Observations by Laser Indirect Sensing Techniques*. Instruments and Observing Methods Report No. 12; World Meteorological Organization (WMO): Geneva, 1982.
- Wakasugi, K.; Fukao, S. Sidelobe Properties of a Complementary Code Used in MST Radar Observations. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* **1985**, GE-23 (1), 57–59. <https://doi.org/10.1109/TGRS.1985.289500>.
- Wang, J.; Rannat, K.; Jones, J. et al. *Global Navigation Satellite System (GNSS) – Precipitable Water (PW) Omnibus*; GRUAN-TD-6. GCOS Reference Upper-air Network (GRUAN) Lead Centre. <https://www.gruan.org/documentation/gruan/td/gruan-td-6>.
- Wang, J.; Zhang, L.; Dai, A. Global Estimates of Water-Vapor-Weighted Mean Temperature of the Atmosphere for GPS Applications. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* **2005**, 110 (D21). <https://doi.org/10.1029/2005JD006215>.
- Wang, J.; Zhang, L.; Dai, A. et al. A Near-Global, 2-Hourly Data Set of Atmospheric Precipitable Water from Ground-Based GPS Measurements. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* **2007**, 112 (D11), D11107. <https://doi.org/10.1029/2006JD007529>.
- Ware, R.; Carpenter, R.; Güldner, J. et al. A Multichannel Radiometric Profiler of Temperature, Humidity, and Cloud Liquid. *Radio Science* **2003**, 38 (4). <https://doi.org/10.1029/2002RS002856>.
- Ware, R.; Cimini, D.; Campos, E. et al. Thermodynamic and Liquid Profiling during the 2010 Winter Olympics. *Atmospheric Research* **2013**, 132–133, 278–290. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2013.05.019>.

- Weber, B. L.; Wuertz, D. B. Comparison of Rawinsonde and Wind Profiler Radar Measurements. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* **1990**, 7 (1), 157–174. [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(1990\)007<0157:CORAWP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(1990)007<0157:CORAWP>2.0.CO;2).
- Weber, B. L.; Wuertz, D. B.; Strauch, R. G. et al. Preliminary Evaluation of the First NOAA Demonstration Network Wind Profiler. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* **1990**, 7 (6), 909–918. [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(1990\)007<0909:PEOTFN>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(1990)007<0909:PEOTFN>2.0.CO;2).
- Weitkamp, C., Ed. *Lidar: Range-Resolved Optical Remote Sensing of the Atmosphere*; Springer, 2005. <https://link.springer.com/book/10.1007/b106786>.
- Westwater, E. R.; Snider, J. B.; Falls, M. J. Ground-Based Radiometric Observations of Atmospheric Emission and Attenuation at 20.6, 31.65, and 90.0 GHz: A Comparison of Measurements and Theory. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* **1990**, 38 (10), 1569–1580. <https://doi.org/10.1109/8.59770>.
- Westwater, E. R.; Han, Y.; Irisov, V. G. et al. Remote Sensing of Boundary Layer Temperature Profiles by a Scanning 5-mm Microwave Radiometer and RASS: Comparison Experiments. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* **1999**, 16 (7), 805–818. [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(1999\)016<0805:RSOBLT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(1999)016<0805:RSOBLT>2.0.CO;2).
- Westwater, E. R.; Crewell, S.; Mätzler, C. et al. Principles of Surface-Based Microwave and Millimeter Wave Radiometric Remote Sensing of the Troposphere. *Quaderni della Società Italiana di Elettromagnetismo* **2005**, 1 (3).
- Wilczak, J.; Gossard, E.; Neff, W. et al. Ground-Based Remote Sensing of the Atmospheric Boundary Layer: 25 Years of Progress. *Boundary-Layer Meteorology* **1996**, 78, 321–349. <https://doi.org/10.1007/BF00120940>.
- Woods, C. P.; Stoelinga, M. T.; Locatelli, J. D. et al. Microphysical Processes and Synergistic Interaction between Frontal and Orographic Forcing of Precipitation during the 13 December 2001 IMPROVE-2 Event over the Oregon Cascades. *Journal of the Atmospheric Sciences* **2005**, 62 (10), 3493–3519. <https://doi.org/10.1175/JAS3550.1>.
- World Meteorological Organization (WMO). *Lower Tropospheric Data Compatibility: Low-level Intercomparison Experiment*. Instruments and Observing Methods Report No. 3; Geneva, 1980.
- Xu, G.; Ware, R. (Stick); Zhang, W. et al. Effect of Off-Zenith Observations on Reducing the Impact of Precipitation on Ground-Based Microwave Radiometer Measurement Accuracy. *Atmospheric Research* **2014**, 140–141, 85–94. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2014.01.021>.
-