

## **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, радиозонды атмосферного пограничного слоя, специально оснащенные башни и мачты, специально оснащенные привязные аэростаты). В томе I, главы 12 и 13, 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), WMO (1980), Martner et al. (1993) и 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>).

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 выключены.

## 5.2 МЕТОДЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ С ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ

### 5.2.1 Акустические зонды (сонары)

Действие сонаров (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 ( $180^\circ$ ) 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  $90^\circ$ , 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) и Singal (1990).

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

Моностатический сонар 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 сонаре приемник расположен на некотором удалении от источника звука, что необходимо для приема сигналов, вызываемых флуктуациями скорости.

Моностатический доплеровский сонар 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 сонаре 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 сонарами, 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.

Сонар 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           | $15^\circ$              |
| 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  $15^\circ$  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 скорость-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 трех полос частот (приблизительно 50, 400 и 1 000 МГц), определенных в соответствующих решениях о регулировании распределения спектра, принятых Всемирной конференцией по радиосвязи 1997 г. (резолюция 217). 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<br/>профилометра</i> | <i>Стратосфера</i> | <i>Тропосфера</i> | <i>Нижняя<br/>тропосфера</i> | <i>Атмосферный<br/>пограничный<br/>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 приборов. 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 Wuertz (1990), WMO (1994), Wilczak et al. (1996), Muschinski et al. (2005), Hocking (2011), Doviak and Zrnić (2014), Fukao et al. (2014) и Hocking et al. (2016).

### 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 дополнительные исследования, 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 температуры 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 избегать 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. Или же приблизительные значения радиоярких температур, полученные наземными радиометрами, могут непосредственно вводиться в цифровые модели погоды. Такой подход улучшает результаты путем 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.

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). Эти непрерывные измерения можно также использовать для обнаружения тенденции или времени изменения зафиксированных изменений температуры (для исследований по выбросам газов, загрязнению воздуха, по определению тепловых выбросов городов, для прогнозов неблагоприятных условий погоды и для выпуска предупреждений) (Kadygrov et al., 2003). 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 арктических исследований, исследований на средних широтах и в тропиках были широко продемонстрированы надежность и точность радиометров, обеспечивающих получение профилей метеорологических параметров (Güldner и Spänkuch, 2001; Liljegren et al., 2005). 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). Второй результат (Güldner и Spänkuch (2001)) основан на 18-месячной эксплуатации, в ходе которой ежедневно проводилось сравнение полученных данных радиометра с данными четырех зондирований. Результаты говорят о схожих значениях СКО в диапазоне от 0,6 К (у поверхности земли) до 1,6 К (на высоте 7 км в летнее время и 4 км в зимнее время). Величина СКО данных по водяному пару не превышает  $1 \text{ г} \cdot \text{м}^{-3}$  на всех высотах (Gaffard и Hewison, 2003; Güldner и Spänkuch, 2001).

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. За последние несколько лет рыночные цены на радиометры, регистрирующие профили данных, существенно снизились.

### 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 Рэля или Ми, что зависит от разновидностей частиц и их размеров по отношению к длине падающей волны лазера (более подробное описание рассеяния Рэля см. в главе 7 настоящего тома). Оба эти основных процесса рассеяния могут происходить в атмосфере одновременно.

Дополнительную информацию можно почерпнуть в работах Hinkley (1976), WMO (1982), Thomas (1991) и Syed и Browell (1994).

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 фотоумножитель или фотодиод. Полученная информация обычно поступает на дисплей для оперативного мониторинга и далее в компьютер для более детального анализа.

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 Рэля 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. том I, глава 15).

Лидары используются также для обнаружения взвешенных частиц, присутствующих в относительно чистом воздухе, и для составления карт некоторых структурных особенностей, таких как термическая устойчивость и высота инверсий. 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 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.

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.

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 воды, 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, что небезопасно для глаз при практическом применении.

Лидарные системы предоставляют большой объем полезной информации для научных исследований, однако их эксплуатация имеет ограничения. Это 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.

### 5.2.6 **Глобальная навигационная спутниковая система**

Главной целью ГНСС является определение местоположения, однако, поскольку атмосферная составляющая влияет на точность оценки местоположения, метеорологическое содержание может быть получено по расчетной ошибке. 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 WMO (2006b).

### 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 развернуты или разворачиваются четыре системы: ГСOM (США), ГЛОНАСС (Российская Федерация), Галилео (Европейский союз) и Компасс (Китай). 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 ГСOM 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;  $\rho$  — геометрическая дистанция между фазовым центром спутника и фазовым центром приемника;  $dt_{\text{sat}}$  — сдвиг спутникового датчика времени;  $dt_{\text{rec}}$  — сдвиг датчика времени приемника;  $L_{\text{atm}}$  — задержка в тропосфере или общая наклонная задержка, обусловленная рефрактивным характером атмосферы;  $I$  — задержка в ионосфере вдоль трассы луча;  $\delta_{\text{rel}}$  — релятивистическая ошибка;  $K$  — инструментальная погрешность приемника;  $M$  — эффект многолучевости;  $\delta_{\text{tide}}$  — 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),  $\omega_L$  — вклад одной длины волны, обусловленный круговой поляризацией сигнала; и  $\varepsilon$  — 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:

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

где  $D (= \int ds)$  — это геометрическое расстояние, а  $\Delta S$  — чрезмерная траектория, обусловленная фактором изгиба; последний может не учитываться для углов места более 10 градусов. Преломляющая способность  $N$  определяется как  $N = 10^6 (n - 1)$  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  $\rho$  — это плотность воздуха ( $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$ );  $\rho_w$  — плотность водяного пара ( $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$ );  $T$  — температура (К) и  $R_v = 287,05 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$  и  $R_d = 461,51 \cdot \text{Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$  — 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  $k_3 = 373 \cdot 900 \text{ К}^2 \cdot \text{гПа}^{-1}$  (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

Гидростатическая задержка по вертикали связана с сухой составляющей атмосферы и в силу своего стационарного характера может быть рассчитана весьма точно, используя данные измерений приземного давления ( $p_s$ ) и местоположение приемника (высота  $h$  и широта  $\varphi$ ), используя, например, аппроксимацию Саастамойнена (1972), а именно:

$$\text{ZHD}_{\text{saas}}(p_s, h, \varphi) = 2.2768 \cdot 10^{-5} p_s \left( 1 - 2.66 \cdot 10^{-3} \cos(2\varphi) - 2.8 \cdot 10^{-7} h \right)^{-1} \quad (5.7)$$

ZHD представляет приблизительно 90 % общей задержки по тропосферной трассе. С другой стороны, невозможно достаточно хорошо смоделировать ZWD на основе приземных данных из-за неравномерного распределения водяного пара в атмосфере. Формула ZWD может быть переписана следующим образом (согласно Davis et al., 1985):

$$\text{ZWD} = 10^{-6} \left[ k_2 R_v - k_1 R_d + k_3 R_v \left( \int_z \rho_w T^{-1} dz \right) \left( \int_z \rho_w dz \right)^{-1} \right] \int_z \rho_w dz \quad (5.8)$$

и посредством определения взвешенной средней температуры в виде:

$$T_m = \left( \int_z \rho_w dz \right) \left( \int_z \rho_w T^{-1} dz \right)^{-1} \quad (5.9)$$

затем:

$$ZWD = k'(T_m) \int \rho_w dz = k'(T_m) IWV \quad (5.10)$$

где IWV — это вертикально интегрированный столб водяного пара, находящегося над приемником GCOM. Основываясь, например, на данных радиозондовых наблюдений, можно рассчитать средневзвешенную температуру по приземной температуре ( $T_s$ ), т. е.  $k'(T_m) \approx k(T_s)$  (Bevis et al., 1994). Таким образом, IWV может быть рассчитано, используя оценочное значение ZTD, данные о приземном давлении ( $p_s$ ), высоте антенны ( $h$ ) и широте ( $\varphi$ ) приемника:

$$IWV = k(T_s)^{-1} (ZTD - ZHD_{saas}(p_s, h, \varphi)) \quad (5.11)$$

Величина  $k(T)$  приблизительно равна  $6,5 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$ .

#### 5.2.6.4 Неопределенности измерений

Поскольку ZTD является оценочной величиной, точность ее расчета зависит от используемого метода, точности используемой исходной информации, стабильности местоположения приемника и многих других факторов. Например, точность позиции спутниковых орбит будет в целом более высокой через приблизительно 14 дней после того, когда доступными станут так называемые окончательные орбиты. В этой связи необходимо проводить различия между расчетами ZTD в оперативном режиме времени и расчетами после обработки данных. Точность показателя IWV, очевидно, тесно связана с точностью расчета ZTD.

Неопределенность измерений при расчетах в оперативном режиме времени составляет порядка 10 мм. Для расчетов, проведенных после обработки данных, это значение составляет порядка 5–7 мм. Неопределенность измерений IWV зависит от общего количества водяного пара и составляет порядка 5–10 % (Elgered et al., 2004). Средние величины характеризуются четким сезонным признаком: в средних широтах весьма низкие значения могут наблюдаться зимой (ниже  $5 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2}$ ), а значения в  $40 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2}$  могут наблюдаться в течение лета. В тропиках необычными не являются значения выше  $50 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2}$ .

### 5.3 КОНТАКТНЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

#### 5.3.1 Шаропилотные наблюдения

Шаропилотные наблюдения часто используются для получения данных о ветре в атмосферном пограничном слое и обычно выполняются с помощью оптических теодолитов или радиолокаторов слежения. В томе I, глава 13, 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.

Для слежения с помощью радиолокатора под шаром подвешивается небольшая радиолокационная мишень. При зондировании в нижней тропосфере радиолокатор должен обеспечивать измерение данных с короткими интервалами, равными 100 м; при этом в идеале следовало бы запускать шар с площадки, отдаленной от локатора в подветренном направлении на расстояние, превышающее этот минимальный интервал.

Основные измерения ветра могут проводиться с использованием одного оптического теодолита, но для того, чтобы получить достаточно точные профили ветра, требуется система из двух теодолитов. Базисная линия между теодолитами должна превышать один километр. Для облегчения процесса зондирования, а также для обеспечения большей

точности определения высоты теодолиты должны быть оснащены компьютерными интерфейсами для своевременного ввода данных и проведения необходимых расчетов. При хороших условиях видимости профили можно получать до высоты 3 000 м. Однако этот метод непригоден при неблагоприятных условиях, таких как при выпадении осадков, низкой облачности или тумане.

Разумеется, существует возможность получения дополнительных данных о ветре в нижней атмосфере с использованием обычных радиозондов путем проведения более частых измерений в течение первых нескольких минут нормального полного зондирования, т. е. от 2 до 10 измерений в минуту.

### 5.3.2 Радиозонды атмосферного пограничного слоя

Обычные радиозондовые системы подробно описаны в томе I, глава 12. Для проведения наблюдений в атмосферном пограничном слое и нижней тропосфере разработаны специальные радиозонды. Они отличаются от обычных радиозондов тем, что обеспечивают повышенную чувствительность и позволяют проводить более частые измерения. Такие радиозонды обычно используются для измерения профилей температуры, влажности и ветра в слое от поверхности Земли до высоты обычно 3—5 км.

Скорость вертикального подъема таких радиозондов обычно устанавливается между 150 и 200 м·мин<sup>-1</sup>, т. е. подъем происходит значительно медленнее, чем в случае обычных радиозондов. Медленный подъем позволяет более детально измерять вертикальные профили. Скорость подъема обычно определяется выбором оболочки соответствующих размеров, но может изменяться путем применения тормозного парашюта.

Поскольку приборы должны достигать лишь ограниченной высоты, они обычно могут подниматься с помощью шаропилотной оболочки. В остальном процесс зондирования и обработки данных почти тот же самый, что и при обычном радиозондировании.

В случае зондирований до высоты не более 2 000 м можно обойтись без датчика давления, в результате чего радиозонд станет более простым и дешевым. Имеются также еще более простые системы, которые измеряют только температуру.

К радиозондам атмосферного пограничного слоя предъявляются следующие основные требования<sup>1</sup>:

| <i>Переменная</i> | <i>Рабочий диапазон</i>     | <i>Разрешение</i>      |
|-------------------|-----------------------------|------------------------|
| Давление          | 1 050 до 500 гПа            | ±0,5 гПа               |
| Температура       | +40 °С до -40 °С            | ±0,1 К                 |
| Влажность         | 100 % до 20 (или 10) %      | ±2 %                   |
| Скорость ветра    | 0,5 до 60 м·с <sup>-1</sup> | ±0,5 м·с <sup>-1</sup> |
| Направление ветра | 0° до 360°                  | ±5°                    |

Измерения обычно производятся, по крайней мере, каждые 30 с для получения вертикального разрешения от 50 до 100 м.

### 5.3.3 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).

<sup>1</sup> Данные требования к измерениям профиля в пограничном слое отличаются от требований к приземным измерениям, содержащихся в приложении 1.А главы 1 тома I.

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 предназначаются 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.

#### 5.3.4 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 долговременного 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 м<sup>3</sup>), либо малые (приблизительно 10—100 м<sup>3</sup>) 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<sup>-1</sup> у поверхности Земли и до 15 м·с<sup>-1</sup> 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<sup>-1</sup>). 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 следующему<sup>2</sup>:

| <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) %      | ±2 %                   |
| Скорость ветра    | 0,5 до 15 м·с <sup>-1</sup> | ±0,5 м·с <sup>-1</sup> |
| 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 гидростатики, используя наблюдаемое распределение давления, температуры и влажности. Таким образом, приращение в геопотенциальных метрах от уровня  $n$  до уровня  $n+1$  выражается формулой:

$$29,27 T_v \ln(p_n / p_{n+1}) \quad (5.12)$$

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 Смитсоновские 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

<sup>2</sup> Данные требования к измерениям профиля в пограничном слое отличаются от требований к приземным измерениям, содержащихся в приложении 1.А главы 1 тома I.

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. 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 приложении<sup>1</sup> описано использование гетеродинных импульсных доплеровских лидарных систем. Некоторая общая информация о непрерывных доплеровских лидарах содержится в дополнении 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 дополнении В.

В данном приложении не рассматривается получение вектора ветра.

---

<sup>1</sup> 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,**  $\beta$ . 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,  $R_{\text{MaxA}}$ .** Максимальное расстояние, до которого сигнал лидара записывается и обрабатывается.

Примечание: зависит от количества точек захвата и частоты измерений.

**Максимальная дальность действия,  $R_{\text{MaxO}}$ .** 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,  $R_{\text{MinA}}$ .** 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,  $R_{\text{MinO}}$ .** 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.А.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.

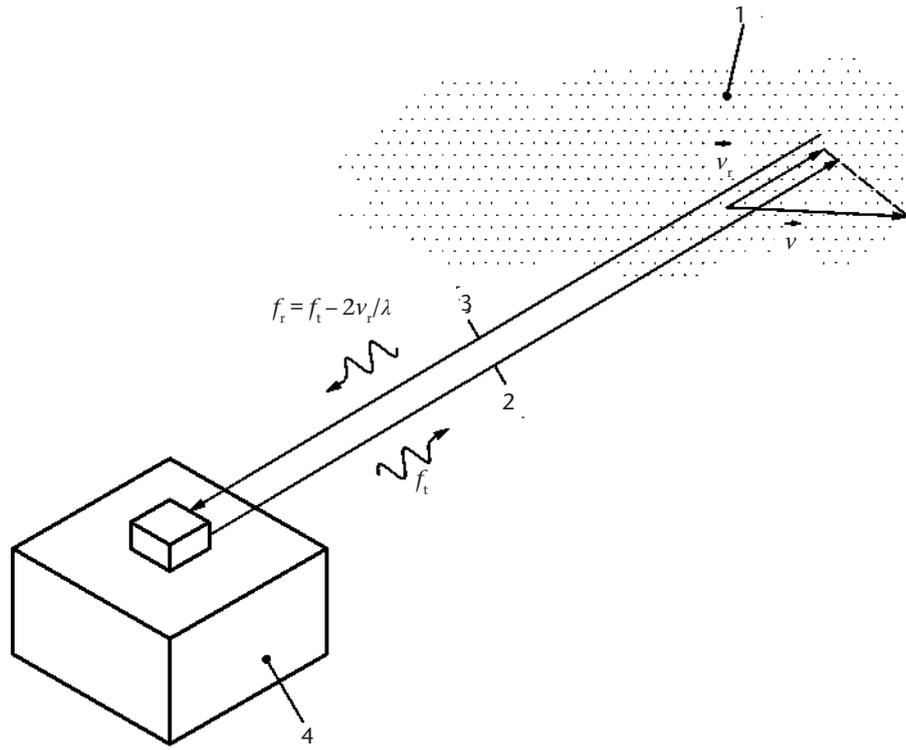
Цель анализа заключается в измерении разницы  $\Delta f$  между частотой испускаемого лазерного импульса  $f_t$  и частотой обратного рассеяния света  $f_r$ . Согласно уравнению Доплера эта разница пропорциональна составляющей скорости ветра по линии визирования, как свидетельствует формула 5.А.1:

$$\Delta f = f_r - f_t = -2v_r / \lambda \quad (5.А.1)$$

где:

$\lambda$     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).



**Обозначения**

- 1 Рассеивающие частицы, перемещающиеся вместе с ветром
- 2 Оптический путь испускаемого лазерного импульса (лазерный луч)
- 3 Оптическая ось приемника
- 4 Лидар

**Рисунок 5.А.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.А.2 показывает линейную связь между дальностью и временем.

$$x = c \cdot \frac{t}{2} \tag{5.А.2}$$

**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.А.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  $f_t + \Delta f - f_{10}$ :

$$i(t) = 2 \cdot \underbrace{\frac{\eta \cdot e}{h \cdot f_t} \cdot K \cdot \xi(t) \cdot \sqrt{\gamma(t) \cdot P_r(t) \cdot P_{10}}}_{i_{\text{het}}(t)} \cdot \cos[2\pi(\Delta f + f_t - f_{10}) \cdot t + \varphi(t)] + n(t) \tag{5.А.3}$$

где:

$t$  время;

$h$  постоянная Планка;

$\eta$  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;

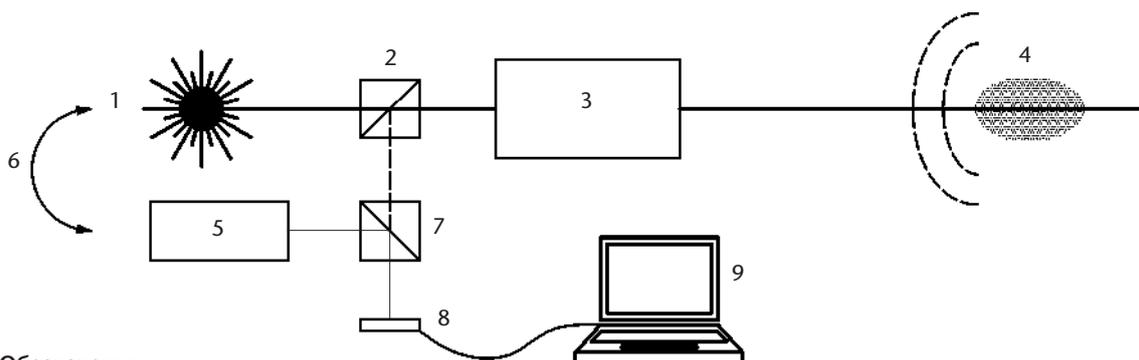
$f_{lo}$  частота гетеродина;

$\varphi(t)$  случайная фаза;

$n(t)$  белый шум детектирования;

$i_{het}(t)$  сигнал гетеродина.

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



#### Обозначения

- 1 Импульсный лидар
- 2 Оптический элемент, разделяющий переданный и принимаемый свет
- 3 Телескоп (используемый для передачи и приема)
- 4 Рассеивающие элементы
- 5 Гетеродинный лазер (непрерывный лазер)
- 6 Подстройка частоты (это устройство задает разницу  $f_t - f_{lo}$ )
- 7 Оптический элемент, который соединяет луч гетеродина с оптической осью луча получаемого света и микширует их
- 8 Квадратичный детектор
- 9 Аналого-цифровой преобразователь и устройство обработки цифрового сигнала

Рисунок 5.А.2. Принцип гетеродинного детектирования

от турбулентности рефракционного индекса ( $Cn^2$ ) 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.A.4  $P_r(t)$  — мгновенная мощность обратно рассеянного света. Она представлена основным уравнением оптической локации (см. ссылку [3]):

$$P_r(t) = A \cdot \int_0^{+\infty} x^{-2} \cdot G(x) \cdot g\left(t - \frac{2x}{c}\right) \cdot \beta(x) \cdot \tau^2(x) dx \quad (5.A.4)$$

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;

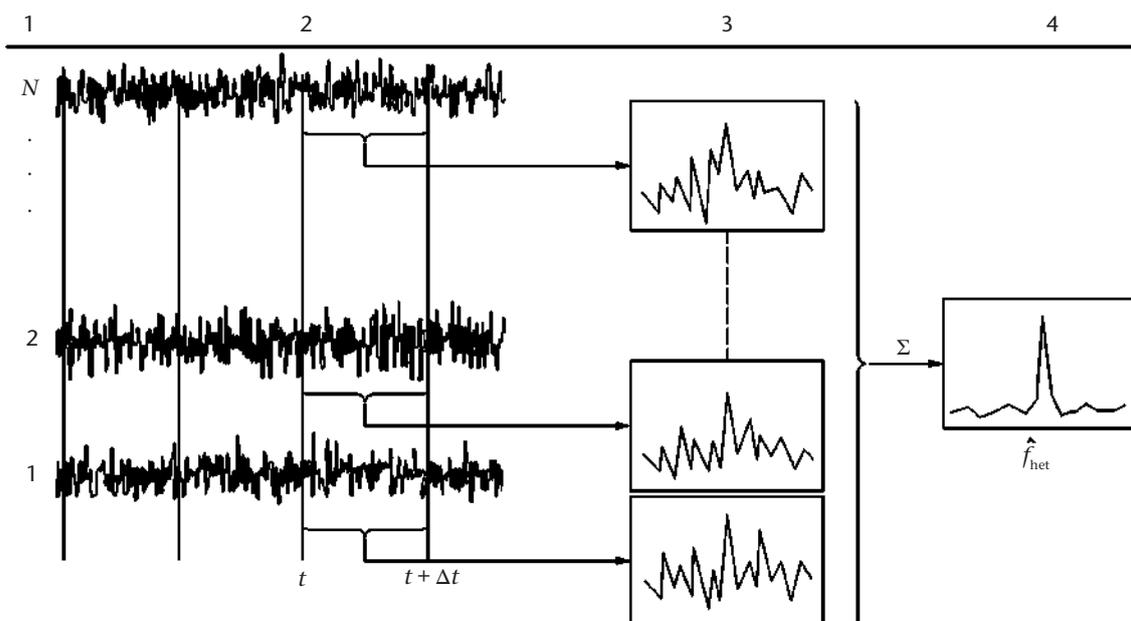
$\tau(x)$  прозрачность атмосферы как функция коэффициента ослабления,  $\alpha$ .

### 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.A.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  $t_{\text{int}} = 1/f_{\text{PRF}}$  ( $f_{\text{PRF}}$  — частота повторения импульса). Анализ сигнала заключается в усреднении функций плотности мощности сигналов с селективированием по дальности. Затем для оценки центральной частоты пика сигнала используется алгоритм оценивания частоты. На рисунке 5.A.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  $\hat{f}_{\text{het}}$  и, таким образом, интервал измеряемых радиальных скоростей. Согласно ссылке [5] по формуле 5.A.5 можно оценить среднее значение строба дальности реальной радиальной скорости ветра:

$$\hat{v}_r = -\frac{\lambda}{2} (\hat{f}_{\text{het}} - f_t + f_{\text{lo}}) \quad (5.A.5)$$

**Обозначения**

- $t$  Время, прошедшее с момента испускания лазерного импульса  
 $\Delta t$  Продолжительность временного интервала спектрального анализа (задает размер строба дальности)  
 $N$  Число сигналов  
 1 Импульсы  
 2 Временные ряды  
 3 Спектры  
 4 Доплеровская частота

**Рисунок 5.А.3. Диаграмма, показывающая проведение частотного анализа**

Например, в случае, когда сигнал является вещественной величиной (а не комплексной демодуляцией), смещение частоты  $f_t - f_{i0}$  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  $F_s \geq 8v_{\max} / \lambda$ .

Ядром усреднения является функция свертки между профилем импульса и профилем строба дальности. Ее длина является функцией отпечатка импульса в атмосфере,  $\Delta r$  (см. формулу 5.А.6), строба дальности  $\Delta x$  и весового коэффициента  $\kappa$ , где  $\kappa$  — отношение полной ширины на уровне половины максимума (ПШПМ) строба к  $\Delta x$ .

$$\Delta r = \frac{c \cdot T_p}{2} \quad (5.A.6)$$

где:

$T_p$  продолжительность ПШПМ мгновенной интенсивности лазерного импульса,  $g(t)$ .

Разрешение по дальности  $\Delta R$  определено как ПШПМ ядра усреднения. Для гауссового импульса и невзвешенного строба дальности  $\Delta R$  рассчитывается по формуле 5.А.7<sup>[6]</sup>:

$$\Delta R = \frac{c}{2} \cdot \frac{\Delta t}{\operatorname{erf}\left(\frac{\sqrt{\pi} \cdot \Delta t}{2T_p}\right)} = \frac{\Delta x}{\operatorname{erf}\left(\frac{\sqrt{\pi} \cdot \Delta x}{2\Delta r}\right)} \quad (5.A.7)$$

Для гауссового импульса и гауссового взвешенного строба дальности  $\Delta R$  соответствует формуле 5.А.8:

$$\Delta R = \frac{c}{2} \cdot \sqrt{T_p^2 + (\kappa \cdot \Delta t)^2} = \sqrt{\Delta r^2 + (\kappa \cdot \Delta x)^2} \quad (5.A.8)$$

Как показано на рисунке 5.А.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.А.9:

$$p(\hat{f}_{\text{het}}) = \begin{cases} \frac{b}{2f_{\max}} + \frac{1-b}{\sqrt{2\pi}\sigma_f} \exp\left(-\frac{(\hat{f}_{\text{het}} - \bar{f}_{\text{het}})^2}{2\sigma_f^2}\right), & \text{for } \hat{f}_r \in [-f_{\max}, f_{\max}] \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5.А.9)$$

В принципе средняя частота  $\bar{f}_{\text{het}}$  может отличаться от «истинной» частоты гетеродинного сигнала  $f_{\text{het}}$ . 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  $\sigma_f$  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.А.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<sup>[1]</sup>) 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.А.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 дополнении 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 негомогенных ветровых полей, таких как дивергенция и ротация. См. примеры применений в дополнении С.

#### 4.5 Источники шума и неопределенностей

##### 4.5.1 Гетеродинный флуктуационный шум

Флуктуационный шум обозначается как  $n(t)$  в формуле 5.А.3. Его изменчивость пропорциональна мощности гетеродина, как показано в формуле 5.А.10:

$$\langle n_{SN}^2 \rangle = 2eSP_{10}B \quad (5.A.10)$$

где:

$S$  чувствительность детектора,  $S = \frac{\eta e}{hf_t}$ , где  $\eta$  — 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.А.11<sup>[6]</sup>:

$$\text{CNR} = \frac{\eta \cdot K \cdot \gamma(t)}{h \cdot f_t \cdot B} P_r(t) \quad (5.A.11)$$

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.А.12:

$$\langle n_{DN}^2 \rangle = 2e i_D B \quad (5.A.12)$$

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.А.13:

$$\langle n_{TN}^2 \rangle = \frac{4k_B T}{R_L} B \quad (5.A.13)$$

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.

$$n_{\text{RIN}}^2 = (SP_{10})^2 10^{0.1\text{RIN}_B} \quad (5.A.14)$$

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.A.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  $f_r - f_{10}$ . Любая неопределенность данного значения ведет к отклонениям значения  $\hat{f}_r$ . Если частота лазера  $f_l$  не стабильна, она должна быть либо измерена, либо закреплена на  $f_{10}$ .

#### 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  $\varepsilon_t$  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.A.15:

$$R_p = \frac{c \cdot T_p}{2} \quad (5.A.15)$$

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.А.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.А.16:

$$R_{MaxO} = \frac{c}{2f_{PRF_{max}}} \quad (5.А.16)$$

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.А.1.

Таблица 5.А.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.А.2.

**Таблица 5.А.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.А.3.

**Таблица 5.А.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 2π. 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 надир может быть использовано для начального положения устройства |

| Характеристики системы ориентации | Примечания   |
|-----------------------------------|--|
| 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.<br>В других сценариях измерения можно использовать так называемый метод «шага и взгляда» с фиксированным положением прибора в моменты измерения |
| 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).<br>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.А.4, позволяет классифицировать чувствительность импульсного лидара независимо от параметров атмосферы. Показатель качества выводится из основного уравнения оптической локации (см. формулу 5.А.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.

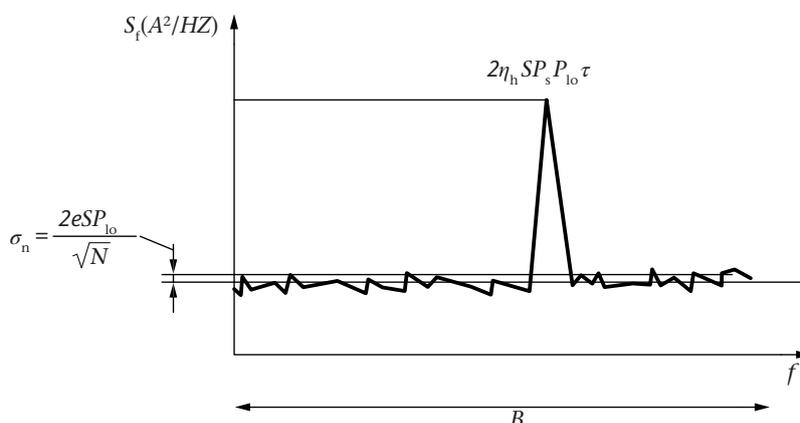


Рисунок 5.А.4. Пример показателя качества

ПК определяется для набора параметров лидара, как показано в формуле 5.A.17:

$$\text{FOM} = \eta_{\text{all}} \cdot E \cdot T_p \cdot D^2 \cdot \sqrt{t_i \cdot f_{\text{PRF}}} \quad (5.A.17)$$

где:

- $\eta_{\text{all}}$  общая эффективность, принимая во внимание качество луча и изображения, общий коэффициент пропускания и усечения;
- $E$  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;
- $f_{\text{PRF}}$  частота следования импульсов.

ПК пропорционален квадратному корню из числа  $N$  накопленных спектров:  $N = t_i \cdot f_{\text{PRF}}$ .

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,  $\eta_{\text{all}}$  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<sup>[3]</sup>. 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·м<sup>2</sup>, максимальная рабочая дальность действия, выраженная в км, почти равна квадратному корню ПК.

В таблице 5.A.4 показаны вычисления ПК для типичных лидарных цифровых показателей и соответствующего им типичного диапазона измерений.

### 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

**Таблица 5.А.4. Показатель качества для типичных лидарных цифровых показателей и соответствующего им типичного диапазона измерений**

| $\eta$ | $E$<br>(мДж) | $T_p$<br>(нс) | $D$<br>(м) | $f_{PRF}$<br>(Гц) | $t_i$<br>(с) | ПК<br>(мДж·нс·м <sup>2</sup> ) | Типичный<br>диапазон<br>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                                     |

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:

- а) правильность (или систематическую погрешность) как статистическое среднее различие между большим количеством измерений и истинным значением;
- б) 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 predetermined вероятностью возникновения (например, 95 %).

Значение погрешности ( $1\sigma$ ) 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<sup>[13]</sup>. Для применений, связанных с энергией ветра, требования могут быть выше (0,2 м/с).

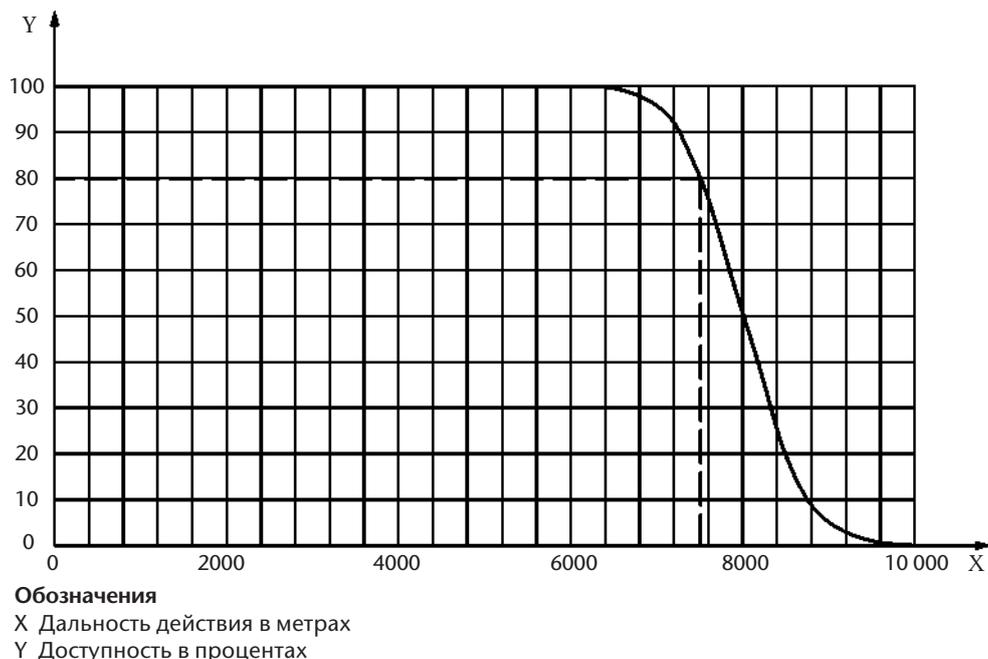
#### 5.3.2 Доступность данных

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.А.5 показана типичная доступность данных импульсного лидара в зависимости от расстояния.



**Рисунок 5.А.5. Пример максимальной рабочей дальности действия**

В этом случае для 80 % доступности данных ( $P_{80}$ ) дальность действия составляет 7 500 м.

Производительность, показанная на этой диаграмме, получена для стандартной атмосферы:

- отсутствие облаков вдоль линии визирования;
- отсутствие осадков;
- 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  $f_t - f_{i0}$  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

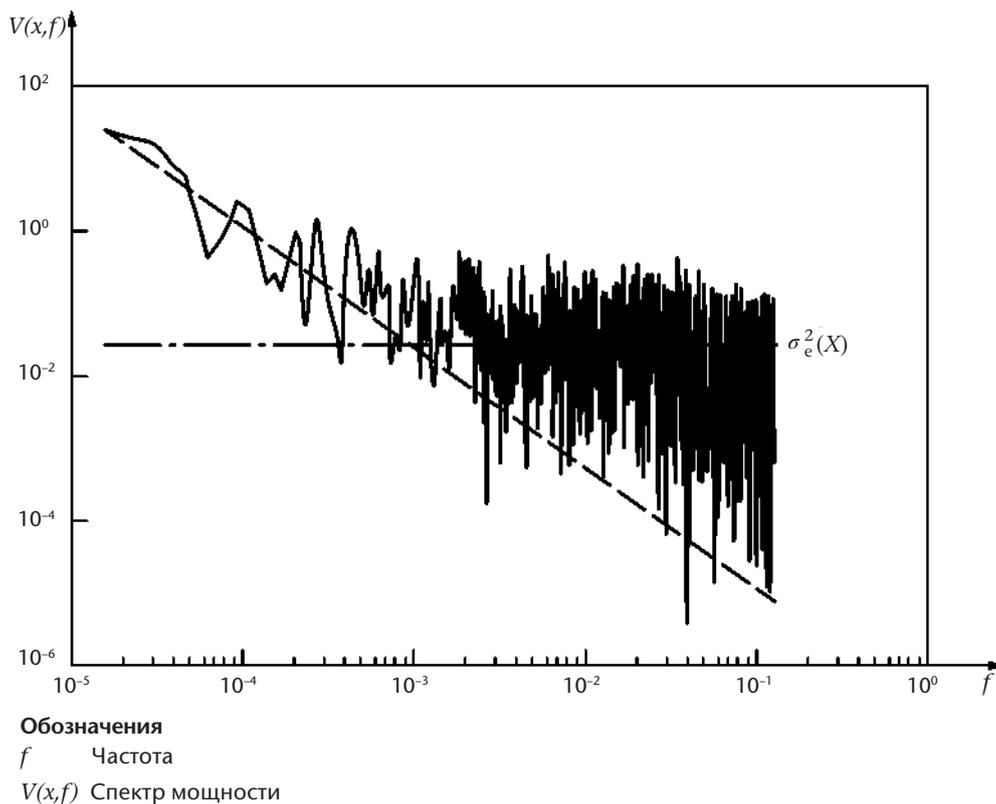
В данном испытании луч импульсного лидара направлен вертикально вверх, а данные измерения радиальной скорости собираются в течение по меньшей мере 20 мин с частотой не менее одного профиля радиальных скоростей в секунду. Обозначим через  $v_r(x, k)$ ,  $k = 1, \dots, K$  временной ряд радиальных скоростей, измеренных на расстоянии  $x$ . Испытание состоит в формировании спектра мощности временного ряда, как показано в формуле 5.A.18:

$$V(x, f) = \frac{1}{K} \left| \sum_{k=1}^K v_r(x, k) \exp(-2j\pi f k \delta t) \right|^2 \quad (5.A.18)$$

где  $\delta t$  — 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.A.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.



**Рисунок 5.А.6. Спектр мощности измерений радиальной скорости**

Данный метод, полное описание которого дано в ссылке [15], позволяет оценить прецизионность измерения лидара без каких-либо вспомогательных данных.

На рисунке 5.А.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  $1^\circ$  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<sup>[16]; [17]; [18]</sup>. 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.  $R_{\text{MaxO}}$  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.A.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.A.4 и на рисунке 5.A.7) и следовательно для  $R_{\text{MaxO}}$ .

Чтобы не учитывать неблагоприятные условия видимости для когерентных доплеровских ветровых лидаров (туман и исключительно высокая видимость), для измерений дальности 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.A.5. Номера кривых**

| Номер кривой  | 1  | 2  | 3  | 4   | 5   |
|---|----|----|----|-----|-----|
| Типичный ПК для времени интеграции в 1 с (мДж·нс·м <sup>2</sup> ) | 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  $Cn^2$  (зависит от температуры и высоты) может менять  $R_{\text{MaxO}}$  путем изменения волнового фронта пучка. Условия сильной турбулентности должны быть удалены из наборов данных (солнечные дни около полудня), и необходимо следовать экспериментальному протоколу.

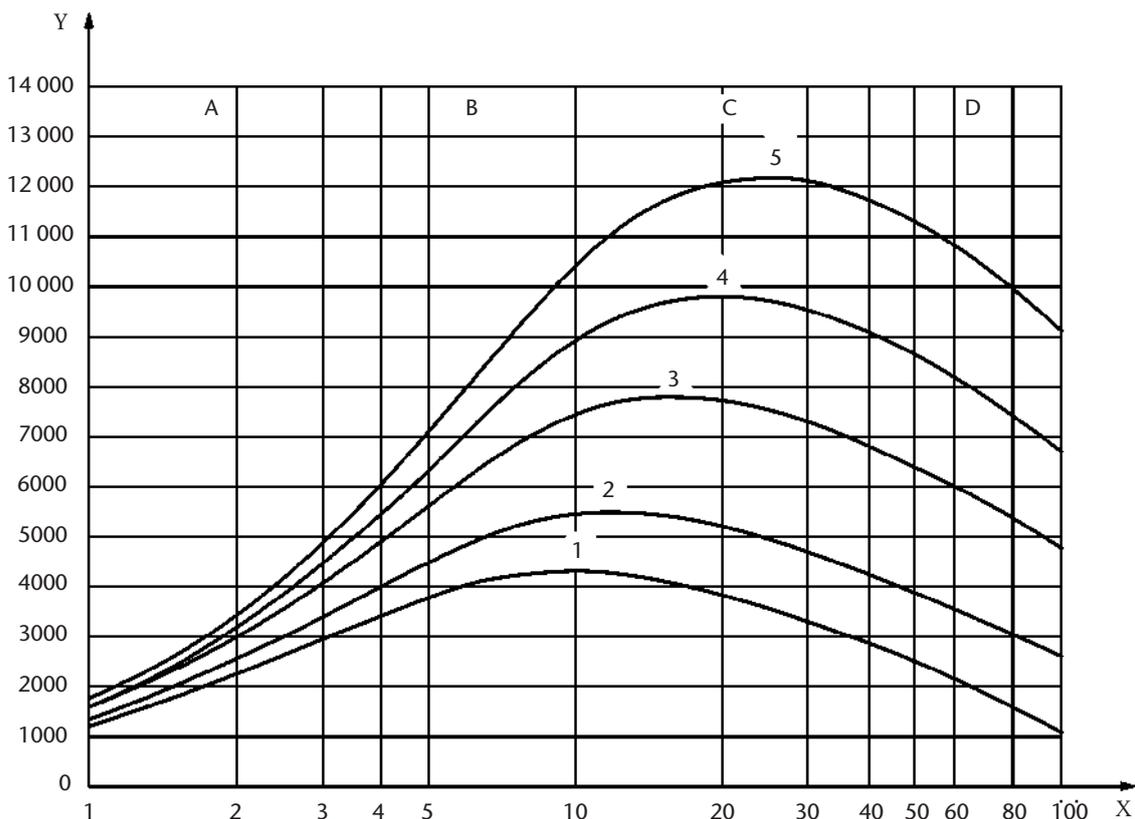
Таким образом, валидация должна проводиться при следующих условиях:

- 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);

- d) отсутствие осадков;
- e) отсутствие облаков на линии визирования;
- f)  $Cn^2 < 10^{-14} \text{ м}^{-2/3}$  (1 м над уровнем земли).

Данные, не соответствующие этим условиям, при оценке максимальной рабочей дальности действия должны быть исключены.

- a) Ситуационные условия регистрируются одновременно (температура,  $Cn^2$ , видимость, относительная влажность);
- b) 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.



- Обозначения**
- X Видимость в км
  - Y Максимальный диапазон в метрах
  - 1-5 Различные значения показателя качества (см. таблицу 5.А.5)
  - A Туман
  - B Мгла
  - C Ясно
  - D Очень ясно

**Рисунок 5.А.7. Зависимость максимальной дальности действия гетеродинного доплеровского сигнала от условий видимости**

## 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<sup>[19]</sup>, 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 дополнении 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.A.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.A.6. Факторы, приводящие к неопределенности**

| <i>Изменяемые переменные</i> | <i>Факторы, приводящие к неопределенности</i>   |
|------------------------------|---|
| Отношение сигнал-шум         | <ol style="list-style-type: none"> <li>a) шум, включая шум детектора</li> <li>b) спекл-эффект (когда во время измерения усредняются только несколько импульсов)</li> <li>c) флуктуации мощности лазерного излучения или длительности импульса</li> <li>d) турбулентность рефракционного индекса (температура)</li> <li>e) угол запаздывания при высоких скоростях вращения</li> </ol> |

| <i>Измеряемые переменные</i>                                    | <i>Факторы, приводящие к неопределенности</i>   |
|---|---|
| Частотный сдвиг, $\Delta f$                                     | a) смещение и флуктуации частоты испускаемых импульсов по сравнению с частотой гетеродина<br>b) длительность импульса<br>c) отношение сигнал-шум<br>d) количество усредненных импульсов<br>e) качество алгоритма оценки |
| <i>Целевая переменная</i>                                       | <i>Фактор неопределенности</i>  |
| Скорость ветра по линии визирования (радиальная скорость ветра) | a) турбулентность ветра<br>b) градиент ветра вдоль линии визирования<br>c) твердые мишени, близкие к стробу дальности<br>d) неоднозначность по дальности<br>e) 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

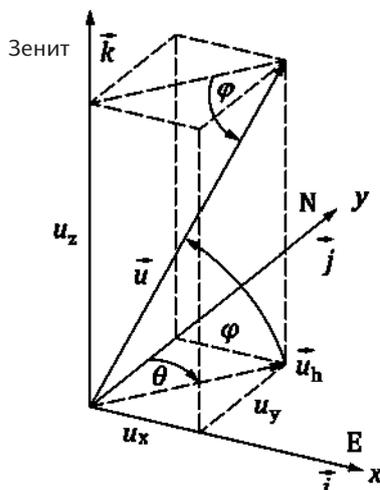
На рисунке ниже представлен вектор ветра  $\vec{u}(\vec{r}, t)$  в декартовой системе координат с единичными векторами  $\vec{i}$ ,  $\vec{j}$ ,  $\vec{k}$ . Компоненты  $u_x$ ,  $u_y$ ,  $u_z$  являются скалярными функциями положения и времени,  $\vec{r} = \vec{r}(x, y, z, t)$  — вектор положения или 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  $\theta$  и  $\phi$  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:  $\theta = 90^\circ$ ,  $\phi = 0^\circ$

$$\Rightarrow u_x = U, u_y = u_z = 0 \Rightarrow \vec{u} = (U, 0, 0)$$

### В.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).

### В.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.A.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)<sup>[20]</sup>:

$$\vec{u}(\vec{r}) = \vec{u}(r, \theta, \phi) = (u_r \cdot \vec{e}_r + u_\theta \cdot \vec{e}_\theta + u_\phi \cdot \vec{e}_\phi) \quad (\text{B.7})$$

где:

- $\vec{e}_r$            единичный вектор в направлении луча;
- $\vec{e}_\theta, \vec{e}_\phi$        единичные векторы в направлении азимута и угла возвышения;
- $u_r, u_\theta, u_\phi$    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  $v_{\text{LOS}}$  равна отрицательному значению радиальной компоненты  $v_r$  вектора местного ветра в точке  $\vec{r}$ . Отрицательный знак  $v_{\text{LOS}}$  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<sup>[19]</sup> 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<sup>[24]</sup>. Позднее методология была расширена для включения дополнительной линейной вариации компонент вектора<sup>[25]</sup>. 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:

$$\begin{aligned} v_r = & \sin \theta \cdot \cos \phi \cdot u_0 + \cos \theta \cdot \cos \phi \cdot v_0 + \sin \phi \cdot w_0 \\ & + r \cdot \sin^2 \theta \cdot \cos^2 \phi \cdot u'_x \\ & + r \cdot \cos^2 \theta \cdot \cos^2 \phi \cdot v'_y \\ & + r \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta \cdot \cos^2 \phi \cdot (u'_y + v'_x) \\ & + \sin \phi \cdot (r \cdot \sin \phi - z_0) \cdot w'_z \\ & + \sin \theta \cdot \cos \phi \cdot (r \cdot \sin \phi - z_0) \cdot (u'_z + w'_x) \\ & + \cos \theta \cdot \cos \phi \cdot (r \cdot \sin \phi - z_0) \cdot (v'_z + w'_y) \end{aligned} \quad (\text{В.13})$$

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.

### C.1.3 **Верификация кривой мощности**

#### C.1.3.1 **Общая информация**

В настоящее время в стандарте 61400-12-1<sup>[27]</sup> 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.

#### C.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.

### C.2 **Мониторинг опасных ветровых явлений для целей авиационной метеорологии**

#### C.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»<sup>[28]</sup> 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<sup>[29]</sup>. 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*<sup>[29]</sup>, и подготовлено *Руководство по сдвигу ветра на малых высотах* ИКАО (Дос. 9817)<sup>[30]</sup>. В Приложении 3 ИКАО проводится различие между двумя аспектами, касающимися сдвига ветра: оповещениями о сдвиге ветра и предупреждениями о сдвиге ветра.

- а) 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;
- б) 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:

- а) 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 глассады<sup>[31]</sup> или линиями визирования вдоль глассады;
- б) 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;
- с) 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;

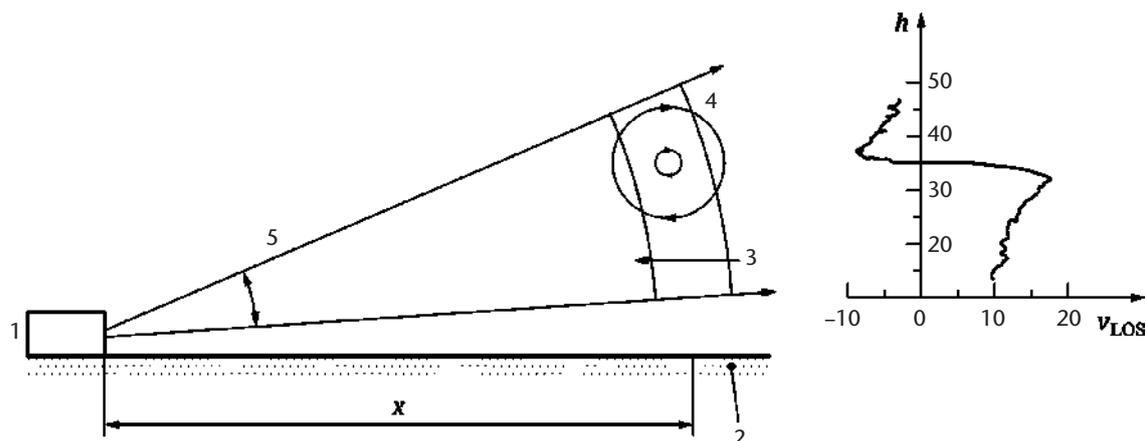
- d) в документах ИКАО указывается типичная частота оповещений, которая подходит для обнаружения сдвигов ветра. Согласно передовой мировой практике эта частота варьируется от 1 до 3 минут;
- e) очень важно отметить, что конфигурации (в частности, время накопления, скорость сканирования, частота оповещения, 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<sup>[32]: [33]</sup>. 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.



**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**

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.

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<sup>[34]; [35]</sup>.

**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  $\theta$  — угол между направлением луча и взлетно-посадочной полосой<sup>[6]</sup>.

Другой аспект заключается в том, что в идеале следует проводить сканирование глассады 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 глассаде 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 глассады.

## **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.

- a) Класс А:  $x \leq 0,1$  м/с (например, для целей ветроэнергетики);
- b) класс В:  $0,1 < x \leq 0,5$  м/с (например, для метеорологических применений)<sup>[13]</sup>;
- c) класс С:  $0,5 < x \leq 1,0$  м/с (например, для прогнозов текущей погоды)<sup>[13]</sup>.

**Типичные области применения и соответствующие требования**

| <i>Применение</i>   | <i>Требуемый параметр</i>  | <i>Ссылка</i>  | <i>Типичная дальность зондирования (м)</i> | <i>Разрешение по дальности (м)</i> | <i>Разрешение по времени (мин)</i> | <i>Точность измерения скорости (м/с)</i> | <i>Точность измерения направления ветра (°)</i> | <i>Минимальная доступность данных (%)</i> |
|---|--|----------------|--|------------------------------------|------------------------------------|--|---|---|
| Картирование радиальной скорости  | Радиальная скорость по линии визирования   | Формула 5.A.5  | 200—10 000                                 | 25—100                             | 1—10                               | 0,5                                      | Неприменимо                                     | 50—99 <sup>a</sup>                        |
| 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  |
| 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  |

| <i>Применение</i>  | <i>Требуемый параметр</i>                                     | <i>Ссылка</i> | <i>Типичная дальность зондирования (м)</i>   | <i>Разрешение по дальности (м)</i> | <i>Разрешение по времени (мин)</i> | <i>Точность измерения скорости (м/с)</i> | <i>Точность измерения направления ветра (°)</i> | <i>Минимальная доступность данных (%)</i> |
|--|---|---------------|--|------------------------------------|------------------------------------|--|---|---|
| Авиация: мониторинг вихрей (наземные системы)                  | Радиальная скорость ветра на плоскостях, перпендикулярных ВПП | —             | Расстояние до ВПП + 300—500 с каждой стороны | 25<br>(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., P. Gatt, D. Rees and R.M.N. Huffaker, 2005: Wind lidar. In: *Laser Remote Sensing* (T. Fujii and T. Fukuchi, eds.). 469–722, CRC Press, ISBN-10: 8247-4256-7.
- [2] Measures, R.M., 1992: *Laser Remote Sensing: Fundamentals and Applications*. Krieger Publishing, 524 pp., ISBN-10: 8946-4619-2.
- [3] Frehlich, R. and M. Kavaya, 1991: Coherent laser radar performance for general atmospheric refractive turbulence. *Appl. Opt.*, 30:5325–5352.
- [4] Belmonte, A., 2003: Analyzing the efficiency of a practical heterodyne lidar in the turbulent atmosphere: telescope parameters. *Opt. Express.*, 11:2041–2046.
- [5] Frehlich, R., S. Hannon and S. Henderson, 1997: Coherent Doppler lidar measurements of winds in the weak signal regime. *Appl. Opt.*, 36:3491–3499.
- [6] Banakh, V.A. and I.N. Smalikho, 1997: Estimation of the turbulence eddy dissipation rate from the pulsed Doppler lidar data. *Atmos. Oceanic Opt.*, 10(12).
- [7] Frehlich, R., 1996: Simulation of coherent Doppler lidar performance in the weak signal regime. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 13:646–658.
- [8] Dabas, A., P. Drobinski and P. Flamant, 2000: Velocity biases of adaptive filters in heterodyne doppler lidar measurements. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 17:1189–1202.
- [9] Dabas, A., 1999: Semi empirical model for the reliability of a matched filter frequency estimator for Doppler lidar. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 16:19–28.
- [10] Goodman, J.W., 1975: Statistical properties of laser speckle patterns. In: *Laser Speckle* (J.C. Dainty, ed.). Springer.
- [11] American National Standards Institute (ANSI) Z136.1-2014: *American National Standard for Safe Use of Lasers*. ISBN: 978-1-940168-00-5.
- [12] IEC 60825-1:2014: *Safety of Laser Products – Part 1: Equipment Classification and Requirement*.
- [13] Всемирная метеорологическая организация: <http://www.wmo-sat.info/oscar/requirements>.
- [14] Boquet, M., P. Royer, J.P. Cariou, M. Machta and M. Valla, 2016: Simulation of doppler lidar measurement range and data availability. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, paper accepted, DOI: 10.1175/JTECH-D-15-0057.1.
- [15] Frehlich, R., 2001: Estimation of velocity error for doppler lidar measurements. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 18:1628–1639.
- [16] Ernsdorf, T., B. Stiller, B.R. Beckmann, A. Weipert, S. Kauczok and R. Hannedes, 2014: Inter-comparison of X-band radar and lidar low-level wind measurement for air traffic control (ATC). Eighth Europ. Conf. on Radar in Meteorol. and Hydrol., Garmisch-Partenkirchen, Germany.
- [17] Hannedes, R., S. Kauczok and A. Weipert, 2014: Quality of clear-air radar radial velocity data: do insects matter? Eighth Europ. Conf. on Radar in Meteorol. and Hydrol., Garmisch-Partenkirchen, Germany.
- [18] Weipert, A., S. Kauczok, R. Hannedes, T. Ernsdorf and B. Stiller, 2014: Wind shear detection using radar and lidar at Frankfurt and Munich airports. Eighth Europ. Conf. on Radar in Meteorol. and Hydrol., Garmisch-Partenkirchen, Germany.
- [19] Jörgensen, H., T. Mikkelsen, J. Streicher, H. Herrmann, C. Werner and E. Lyck, 1997: Lidar calibration experiment. *Appl. Phys. B.*, 64:355–361.
- [20] Bronstein, I.N., K.A. Semendjajew, G. Musiol and H. Mühlig, 1993: *Taschenbuch der Mathematik*. Harri Deutsch.
- [21] Fukao, S. and K. Hamazu, 2013: *Radar for Meteorological and Atmospheric Observations*. Springer.
- [22] Banakh, V.A. and I.N. Smalikho, 2013: *Coherent Doppler Wind Lidars in a Turbulent Atmosphere*. Artech House.
- [23] Srinivaso, R.I., V.K. Anandan and R.R. Narasimha, 2008: Evaluation of DBS wind measurement technique in different beam configurations for a VHF wind profiler. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 25(12):2304–2312.
- [24] Lhermite, R.M., 1962: Note on wind variability with Doppler radar. *J. Atmos. Sci.*, 19(4):343–346.
- [25] Browning, K.A. and R. Wexler, 1968: The determination of kinematic properties of a wind field using Doppler radar. *J. Appl. Meteorol.*, 7(1):105–113.
- [26] Waldteufel, P. and H. Corbin, 1979: On the analysis of single Doppler radar data. *J. Appl. Meteor.*, 18:532–542.
- [27] IEC 61400-12-1:2005: *Wind Turbines – Part 12-1: Power Performance Measurements of Electricity Producing Wind Turbines*.
- [28] European ATM Master Plan, 2009: <https://www.atmmasterplan.eu/>.

- [29] Международная организация гражданской авиации, 2016: Метеорологическое обеспечение международной аэронавигации, Дополнение 3 к Конвенции о международной гражданской авиации.
- [30] Международная организация гражданской авиации, 2005: Руководство по сдвигу ветра на малых высотах, Док. 9817, AN/449.
- [31] Shun, C.M. and P.W. Chan, 2008: Applications of an infrared doppler lidar in detection of wind shear. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 25(5):637–655.
- [32] Wakenet-Eu: <http://www.wakenet.eu/>.
- [33] Lang, S. and W. Bryant, 2006: *Vortex Research in the USA (WakeNet-USA)*. Air Traffic Organization, Federal Aviation Administration.
- [34] Holzäpfel, F., T. Gerz, F. Köpp, E. Stumpf, M. Harris, R.I. Young and A. Dolfi-Bouteyre, 2003: Strategies for circulation evaluation of aircraft wake vortices measured by lidar. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 20(8):1183–1195.
- [35] Dolfi-Bouteyre, A., B. Augere, M. Valla, D. Goular, D. Fleury and G. Canat, 2009: 1,55  $\mu\text{m}$  pulsed fiber lidar for wake vortex detection (axial or transverse). Wakenet-Eu Workshop.
- [36] Hasager, C.B., D. Stein, M. Courtney, A. Pena, T. Mikkelsen, M. Stickland and A. Oldroyd, 2013: Hub height ocean winds over the North Sea observed by the NORSEWInD lidar array: measuring techniques, quality control and data management. *Remote Sens.*, 5:4280–4303.
- [37] ISO 28902-1: *Air Quality – Environmental Meteorology – Part 1: Ground-based Remote Sensing of Visual Range by Lidar*.
- [38] ISO 28902-3: *Air Quality – Environmental Meteorology – Part 3: Ground-based Remote Sensing of Wind by Continuous-wave Doppler Lidar*.
-

## СПРАВОЧНАЯ И ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

- Adachi, A., T. Kobayashi, K.S. Gage, D.A. Carter, L.M. Hartten, W.L. Clark and M. Fukuda, 2005: 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*, 22:1167–1180.
- Angevine, W.M., W.L. Ecklund, D.A. Carter, K.S. Gage and K.P. Moran, 1994: Improved radio acoustic sounding techniques. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 11(1):42–49.
- Bianco, L., D. Gottas and J.M. Wilczak, 2013: Implementation of a Gabor transform data quality-control algorithm for UHF wind profiling radars. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 30(12):2697–2703.
- Bevis, M., S. Businger, S. Chiswell, T.A. Herring, R.A. Anthes, C. Rocken and R.H. Ware, 1994: GPS meteorology: Mapping zenith wet delays onto precipitable water. *Journal of Applied Meteorology*, 33:379–386.
- Brown, E.H. and F.F. Hall, 1978: Advances in atmospheric acoustics. *Reviews of Geophysics and Space Physics*, 16:47–109.
- Cadeddu, M.P., G.E. Peckham and C. Gaffard, 2002: The vertical resolution of ground-based microwave radiometers analysed through a multiresolution wavelet technique. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(3):531–540.
- Candlish, L.M., R.L. Raddatz, M.G. Asplin and D.G. Barber, 2012: Atmospheric temperature and absolute humidity profiles over the Beaufort Sea and Amundsen Gulf from a microwave radiometer. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 29:1182–1201.
- Chan, P.W., 2009: Performance and application of a multi-wavelength, ground-based microwave radiometer in intense convective weather. *Meteorologische Zeitschrift*, 18:253–265.
- Chan, P.W. and Y.F. Lee, 2013: Application of brightness temperature data from a ground-based microwave radiometer to issue low-level windshear alert over Hong Kong International Airport. *Mausam* 64(3):457–466.
- Chan, W.S. and J.C.W. Lee, 2015: Vertical profile retrievals with warm-rain microphysics using the ground-based microwave radiometer operated by the Hong Kong Observatory. *Atmospheric Research*, 161–162:125–133.
- Chakraborty, R., S. Das and A. Maitra, 2016: Prediction of convective events using multi-frequency radiometric observations at Kolkata. *Atmospheric Research*, 169:24–31.
- Davis, J.L., T.A. Herring, I.I. Shapiro, A.E.E. Rogers and G. Elgered, 1985: Geodesy by radio interferometry: Effects of atmospheric modeling errors on estimates of baseline length. *Radio Science*, 20(6):1593–1607.
- Derr, V.E., 1972: *Remote Sensing of the Troposphere*. United States National Oceanic and Atmospheric Administration, WPL, Boulder, Colorado.
- Dolman, B. K. and I.M. Reid, 2014: Bias correction and overall performance of a VHF spaced antenna boundary layer profiler for operational weather forecasting. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 118:16–24.
- Doviak, R. J. and D.S. Zrnić, 2014: *Doppler Radar and Weather Observations*. Academic Press.
- Elgered, G., H.-P. Plag, S. Barlag and J. Nash, 2004: *COST716 Final Report*, European Union.
- Fernández-González, S., F. Valero, J.L. Sanchez, E. Gascón, L. López, E. García-Ortega, and A. Merino, 2014: Observation of a freezing drizzle episode: A case study. *Atmospheric Research*, 149:244–254.
- Fukao, S., K. Hamazu and R.J. Doviak, 2014: *Radar for Meteorological and Atmospheric Observations*. Springer Japan.
- Gaffard, C. and T. Hewison, 2003: Radiometrics MP3000 microwave radiometer trial report. *Technical Report –TR26*, Met Office, Workingham, Berkshire, UK.
- Gaynor, J.E., C.B. Baker and J.C. Kaimal, 1990: The international sodar intercomparison experiment. *Proceedings of the Fifth International Symposium on Acoustic Remote Sensing*. McGraw-Hill, New York, 67–74.
- Gossard, E.E. and R.G. Strauch, 1983: *Radar Observations of Clear Air and Clouds*. Elsevier, Scientific Publishing Co., Amsterdam.
- Güldner, J. and D. Spänkuch, 2001: Remote sensing of the thermodynamic state of the atmospheric boundary layer by ground-based microwave radiometry. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 18:925–933.
- Hinkley, E.D., 1976: *Laser Monitoring of the Atmosphere: Topics in Applied Physics*. Volume 14, Springer Verlag, New York.

- Hocking, W.K., 2011: A review of mesosphere–stratosphere–troposphere (MST) radar developments and studies, circa 1997–2008. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 73(9):848–882.
- Hocking, W.K., J. Röttger, R.D. Palmer, T. Sato and P. B. Chilson (2016): *Atmospheric Radar: Application and Science of MST Radars in the Earth's Mesosphere, Stratosphere, Troposphere, and Weakly Ionized Regions*. Cambridge University Press.
- Hogg, D.C., M.T. Decker, F.O. Guiraud, K.B. Earnshaw, D.A. Merritt, K.P. Moran, W.B. Sweezy, R.G. Strauch, E.R. Westwater and C.G. Little, 1983: An automatic profiler of the temperature, wind and humidity in the troposphere. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 22:807–831.
- Illingworth, A. J., D. Cimini, C. Gaffard, M. Haefelin, V. Lehmann, U. Löhnert and D. Ruffieux, 2015: Exploiting existing ground-based remote sensing networks to improve high-resolution weather forecasts. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 96(12):2107–2125.
- Kadygrov, E.N., E.A. Miller and A.V. Troitsky, 2013: Study of atmospheric boundary layer thermodynamics during total solar eclipses. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 51(9):4672–4677.
- Kadygrov, E.N. and D.R. Pick, 1998: The potential for temperature retrieval from an angular-scanning single-channel microwave radiometer and some comparisons with in situ observations. *Meteorological Applications*, 5:393–404.
- Kadygrov, E.N., G.N. Shur and A.S. Viazankin, 2003: Investigation of atmospheric boundary layer temperature, turbulence, and wind parameters on the basis of passive microwave remote sensing. *Radio Science*, 38(3):13.1–13.12.
- Lataitis, R.J., 1992a: Signal power for radio acoustic sounding of temperature: The effects of horizontal winds, turbulence and vertical temperature gradients. *Radio Science*, 27:369–385.
- , 1992b: *Theory and Application of a Radio-acoustic Sounding System*. NOAA Technical Memorandum ERL WPL-230.
- Liljegren, J.C., S.A. Boukabara, K. Cady-Pereira and S.A. Clough, 2005: 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 radiometer. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 43(5):1102–1108.
- Madhulatha, A., M. Rajeevan, M.V. Ratnam, J. Bhate and C.V. Naidu, 2013: Nowcasting severe convective activity over southeast India using ground-based microwave radiometer observations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(1):1–13.
- Martner, B.E., D.B. Wuertz, B.B. Stankov, R.G. Strauch, E.R. Westwater, K.S. Gage, W.L. Ecklund, C.L. Martin and W.F. Dabberdt, 1993: An evaluation of wind profiler, RASS and microwave radiometer performance. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 74(4):599–613.
- May, P.T., R.G. Strauch, K.P. Moran and W.L. Ecklund, 1990: Temperature sounding by RASS, with wind profiler radars: A preliminary study. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 28(1):19–28.
- Muschinski, A., V. Lehmann, L. Justen and G. Teschke, 2005: Advanced radar wind profiling. *Meteorologische Zeitschrift*, 14(5):609–625.
- Navas-Guzman, F., O. Stahl and N. Kampfer, 2013: 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*, October 2013, Finland, p.136.
- Neff, W.D. and R.L. Coulter, 1986: Acoustic remote sounding. In: *Probing the Atmospheric Boundary Layer* (Lenschow, D.H., ed.). American Meteorological Society, 201–236.
- Panofsky, H.A., 1973: Tower micrometeorology. In: *Workshop on Micrometeorology* (Haugen, D.A., ed.), Chapter 4, American Meteorological Society.
- Saastamoinen, J., 1972: Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging of satellites. *Geophysical Monograph Series: The Use of Artificial Satellites for Geodesy*, 15:247–251.
- Singal, S.P., 1990: Current status of air quality related boundary layer meteorological studies using sodar. *Proceedings of the Fifth International Symposium on Acoustic Remote Sensing*, McGraw-Hill, New York, 453–476.
- Smith, E.K. and S. Weintraub, 1953: The constants in the equation for atmospheric refractive index at radio frequencies. *Proceedings of the IRE*, 41(8):1035–1037.
- Solheim, F., J.R. Godwin, E.R. Westwater, Y. Han, S.J. Keihm, K. Marsh, R. Ware, 1998: Radiometric profiling of temperature, water vapor, and cloud liquid water using various inversion methods. *Radio Science*, 33:393–404.
- Syed, I. and E.V. Browell, 1994: Recent Lidar technology developments and their influence on measurements of tropospheric water vapor. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 11(1):76–84.
- Teschke, G. and V. Lehmann, 2017: Mean wind vector estimation using the velocity–azimuth–display (VAD) method: An explicit algebraic solution. *Atmospheric Measurement Techniques Discussions*, 10:3265–3271.

- Thayer, G.D., 1974: An improved equation for the radio refractive index of air. *Radio Science*, 9(10):803–807.
- Thomas, L., 1991: Lidar probing of the atmosphere. *Indian Journal of Radio and Space Physics*, 20:368–380.
- Thompson, A.R., J.M. Moran and G.W. Swenson, 1986: *Interferometry and Synthesis in Radio Astronomy*. John Wiley and Sons, New York.
- Thompson, N., 1980: Tethered balloons. In: *Air-sea Interaction: Instruments and Methods* (F. Dobson, L. Hasse and R. Davis, eds.) Chapter 31, Plenum Press, New York.
- Wakasugi, K. and S. Fukao, 1985: Sidelobe properties of a complementary code used in MST radar observations. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 23(1):57–59.
- Ware, R., R. Carpenter, J. Güldner, J. Liljegren, T. Nehrkorn, F. Solheim and F. Vandenberghe, 2003: A multi-channel radiometric profiler of temperature, humidity and cloud liquid. *Radio Science*, 38:8079–8092.
- Ware, R., D. Cimini, E. Campos, G. Giuliani, S. Albers, M. Nelson, S.E. Koch, P. Joe and S. Cober, 2013: Thermodynamic and liquid profiling during the 2010 Winter Olympics. *Atmospheric Research*, 132–133:278–290.
- Weber, B.L. and D.B. Wuertz, 1990: Comparison of rawinsonde and wind profiler radar measurements. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 7(1):157–174.
- Weber, B.L., D.B. Wuertz, R.G. Strauch, D.A. Merritt, K.P. Moran, D.C. Law, D. van de Kamp, R.B. Chadwick, M.H. Ackley, M.F. Barth, N.L. Abshire, P.A. Miller and T.W. Schlatter, 1990: Preliminary evaluation of the first NOAA demonstration network wind profiler. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 7(6):909–918.
- Westwater, E., S. Crewell, C. Mätzler and D. Cimini, 2005: Principles of surface-based microwave and millimetre wave radiometric remote sensing of the troposphere. *Quaderni Della Società Italiana di Elettromagnetismo*, 1(3).
- Westwater, E.R., Y. Han, V.G. Irisov, V. Leuskiy, E.N. Kadyrov and S.A. Viazankin, 1999: Remote sensing of boundary layer temperature profiles by a scanning 5-mm microwave radiometer and RASS: Comparison experiments. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 16:805–818.
- Westwater, E.R., J.B. Snider and M.J. Falls, 1990: 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*, 38(10):1569–1580.
- Wilczak, J. M., E.E. Gossard, W.D. Neff and W.L. Eberhard, 1996: Ground-based remote sensing of the atmospheric boundary layer: 25 years of progress. In: *Boundary-Layer Meteorology 25th Anniversary Volume, 1970–1995*, 321–349. Dordrecht, Springer.
- Woods, C.P., M.T. Stoelinga, J.D. Locatelli and P.V. Hobbs, 2005: 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 Atmospheric Science*, 62(10):3493–3519.
- World Meteorological Organization, 1980: *Lower Tropospheric Data Compatibility: Low-level Intercomparison Experiment* (Boulder, United States, 1979). Instruments and Observing Methods Report No. 3. Geneva.
- , 1982: *Indirect Sensing: Meteorological Observations by Laser Indirect Sensing Techniques* (A.O. Van Gysegem). Instruments and Observing Methods Report No. 12. Geneva.
- , 1994: Comparison of windprofiler and rawinsonde measurements (J. Neisser, V. Görsdorf and H. Steinhagen). *Papers Presented at the WMO Technical Conference on Instruments and Methods of Observation (TECO-94)*. Instruments and Observing Methods Report No. 57 (WMO/TD-No. 588). Geneva.
- , 2006a: *Operational Aspects of Different Ground-Based Remote Sensing Observing Techniques for Vertical Profiling of Temperature, Wind, Humidity and Cloud Structure: A Review* (E.N. Kadyrov). Instruments and Observing Methods Report No. 89 (WMO/TD-No. 1309). Geneva.
- , 2006b: *National/Regional Operational Procedures of GPS Water Vapour Networks and Agreed International Procedures* (S. de Haan). Instruments and Observing Methods Report No. 92 (WMO/TD-No. 1340). Geneva.
- Xu, G., R. Ware, W. Zhang and G. Feng, 2014: Effect of the off-zenith observation on reducing the impact of precipitation on ground-based microwave radiometer measurement accuracy in Wuhan. *Atmospheric Research*, 140–141:85–94.