

ГЛАВА 7. ВОПРОСЫ ОБЩЕГО ХАРАКТЕРА

7.1 ВОПРОСЫ ЗАЩИТЫ РАДИОЧАСТОТ

7.1.1 Общее регулирование использования радиочастот

Исключительно важным по значению вопросом для обеспечения наблюдений за Землей из космоса является доступность радиочастотного спектра в микроволновом диапазоне (от 1 до 300 ГГц и выше). Это важно для:

- a) пассивных наблюдений за поверхностью Земли (в окнах прозрачности атмосферы) и за атмосферными газами в полосах поглощения;
- b) активных наблюдений с помощью радиолокаторов (альтиметрия, скатеррометрия, радиолокаторы с синтезированной апертурой);
- c) каналов связи, необходимых для передачи со спутника полученных данных и для управления спутником.

Использование спектра радиочастот координируется на глобальном уровне Международным союзом электросвязи (МСЭ). Регламенты радиосвязи принимаются странами — членами МСЭ на всемирных конференциях по радиосвязи (ВКР) каждые четыре года. МСЭ регулирует выделение полос радиочастот для различных видов применения, называемых «обслуживанием», например, для фиксированной и мобильной телесвязи, широкополосных мобильных применений, радионавигации, наземных радиолокаторов, устройств малого радиуса действия и электронного сбора новостей. Применения в отношении наблюдений за Землей определяются МСЭ как обслуживание в интересах двух специальных служб: Спутниковой службы исследования Земли (ССИЗ) и Метеорологической спутниковой службы (МСС). В то время как некоторые частотные диапазоны выделяются какой-либо службе для исключительного пользования, большинство частотных диапазонов выделяются ряду служб на определенных условиях (таких как с ограничением по количеству, мощности излучения и географическому распределению источников), которые направлены на исключение вредных помех.

С быстрым развитием сектора телесвязи и его возрастающими потребностями в расширении частотного диапазона защита радиочастот для ССИЗ и МСС стала критически важной задачей. К числу проблем, вызывающих озабоченность, относятся следующие:

- a) помехи от неконтролируемых излучений на частотах, используемых исключительно ССИЗ и ММС, или внеполосных излучений от близлежащих частотных диапазонов;
- b) совместное использование частотных диапазонов на условиях, недостаточно строгих для того, чтобы гарантировать надежную защиту;
- c) стремление других обслуживающих отраслей экономики расширить свои диапазоны и использовать частотные диапазоны, формально выделенные для ССИЗ и МСС;
- d) потребности ССИЗ и МСС в использовании новых частот, проявляющиеся в результате развития технологий дистанционного зондирования (например, в микроволновом диапазоне частот свыше 300 ГГц), растущих скоростей передачи данных или расширяющихся частотных диапазонов для телесвязи.

При рассмотрении этих вопросов необходимо учитывать, что частоты, используемые для пассивных методов измерений, не могут быть произвольно выбраны в какой-либо части спектрального диапазона: их выбор определяется законами физики и должен соответствовать либо пиковым поглощениям веществ, составляющих атмосферу, либо каналам для осуществления наблюдений. Природные излучения чрезвычайно слабые

по сравнению с большинством искусственных источников излучения, и поэтому они легко искажаются. Поэтому частотные диапазоны для пассивного радиометрического зондирования должны рассматриваться как естественное наследие, которое необходимо сохранить.

7.1.2 Пассивная микроволновая радиометрия

Спектральный микроволновый диапазон, используемый для наблюдения за Землей, растянут с ~1,4 ГГц (например, для измерения солености океана) до ~2 500 ГГц и более. Самыми критически важными являются вопросы защиты частот ниже 300 ГГц. Использование частот выше ~300 ГГц все еще развивается; более того, поскольку присутствие водяного пара не позволяет наблюдать нижние слои тропосферы, большинство приборов, работающих на этих частотах, предназначаются для определения химического состава атмосферы и используют лимбовые наблюдения, которые делают их менее подверженными к восприимчивости помех от наземных источников. МСЭ установил ограниченное число частотных полос, выделенных ССИЗ, для которых активные использования запрещены или ограничены. По мере того, как радиочастотный спектр становится все более перегруженным и у пользователей появляется потребность в использовании более высоких скоростей передачи данных, отмечается возрастающее давление на более высокие частоты, приводящее к тому, что МСЭ вынуждено распределять частотные полосы, выделенные для ССИЗ, среди действующих служб. Только несколько узких диапазонов выделяются ССИЗ на исключительной основе, что обеспечивает надежную юридическую защиту. Это имеет следующие последствия:

- a) расположение в спектре выделенных микроволновых каналов зачастую не совпадает с пиком чувствительности для измерения необходимой геофизической переменной или с областью спектра, свободной от помех в результате других воздействий;
- b) защищенные частотные полосы могут быть настолько узкими, что отношение сигнала к уровню помех является очень низким; это может привести к рассмотрению возможности использования незащищенного частотного диапазона, в котором имеется более широкая полоса, при допущении риска возникновения помех.

К сожалению, давление со стороны других пользователей частотного спектра, включая коммерческие и мобильные службы, постоянно возрастает; специализированные группы ВМО, Координационной группы по метеорологическим спутникам и космических агентств должны постоянно отслеживать ситуацию при каждом пересмотре Регламента МСЭ.

7.1.3 Активное микроволновое зондирование

Проблема защиты частот также существует и для активного зондирования (альтиметрия, скаттерометрия или радиолокаторы с синтезированной апертурой). Для некоторых видов применений радиолокационного отраженного рассеяния, подобных измерению атмосферных осадков, измерительная частота должна выбираться с учетом физических характеристик измеряемых переменных. В других случаях, таких как альтиметрия или получение изображений с помощью радиолокаторов с синтезированной апертурой, это не так критично, и существует некоторая гибкость в определении частоты в любом из L-, S-, C-, X-, K_u-, K-, K_a-, V- или W-диапазонов частот (см. определения в таблице 2.8, глава 2 настоящего тома).

7.1.4 Эксплуатация спутников и частоты радиосвязи

Выделение частот для системы связи между спутником и наземной станцией является еще одним важнейшим вопросом. В этом случае, поскольку речь идет об активном использовании частот, Регламент МСЭ накладывает очень жесткие ограничения в отношении разрешенных частот, частотного диапазона и мощности излучения. Последствия этого следующие:

Частотные диапазоны, используемые метеорологическими спутниками для передачи данных

<i>Полоса частот (МГц)</i>	<i>Распределения между метеорологическими спутниками</i>
137–138	Первичное для направления космос-Земля
400,15–401	Первичное для направления космос-Земля
401–403	Первичное для направления Земля-космос
460–470	Вторичное для направления космос-Земля
1 670–1 710	Первичное для направления космос-Земля
7 450–7 550	Первичное для направления космос-Земля, только геостационарные спутники
7 750–7 900	Первичное для направления космос-Земля, только негеостационарные спутники
8 025–8 400	Первичное для направления космос-Земля для спутников исследования Земли ^a
8 175–8 215	Первичное для направления Земля-космос
18 000–18 300	Первичное для направления космос-Земля в Районе 2, ^b только геостационарные спутники
18 100–18 400	Первичное для направления космос-Земля в Районах 1 и 3, ^b только геостационарные спутники
25 500–27 000	Первичное для направления космос-Земля для спутников исследования Земли ^a

Примечания:

- a Поскольку метеорологические спутники являются подклассом Спутниковой службы исследования Земли, распределенные частоты для Спутниковой службы исследования Земли (например 25 500–27 000 МГц) могут также использоваться для работы с прикладными программами метеорологических спутников.
- b Районы 1, 2 и 3 относятся к Районам радиосвязи МСЭ.

- a) более высокая стоимость наземных принимающих станций, работающих с низким уровнем сигнала;
- b) более высокие расходы из-за недостаточного частотного диапазона, доступного в одной полосе, для передачи данных, в результате чего приходится перераспределять ресурсы и задействовать более высокочастотные полосы, что требует использования более современной технологии и ориентирования антенны;
- c) прежде всего, более сложное обеспечение сохранности частоты, особенно для передачи данных в реальном времени; доступно меньше частот и иногда это провоцирует помехи, возникающие между спутниками одного семейства, которые одновременно находятся на орбите.

В любом случае, защиту радиочастоты трудно гарантировать, и пользователи испытывают проблемы, особенно в промышленно развитых районах. В таблице в этом разделе представлены частотные диапазоны, выделенные для передачи данных на метеорологические спутники и с них (WMO/ITU, 2008). В ней также учитывается частотный диапазон 7 850–7 900 МГц, который был добавлен на ВКР-12.

7.2 МЕЖДУНАРОДНАЯ КООРДИНАЦИЯ

7.2.1 Координационная группа по метеорологическим спутникам

Исходя из задачи долгосрочного обеспечения функционирования спутниковых программ, Координационная группа по метеорологическим спутникам (КГМС) в соответствии с согласованной базовой конфигурацией координирует работу спутниковых группировок на геостационарных и низких околоземных орбитах в поддержку программ ВМО и программ, спонсируемых ВМО. Учрежденная в 1972 г. с акцентом на мониторинге погоды с геостационарных спутников в целях прогнозирования погоды, КГМС с самого начала определяла общие стандарты для распространения изображений с низким разрешением в формате при факсимильной передаче метеорологических карт и для Международной системы сбора данных в поддержку мобильных станций, наблюдаемых различными спутниками. Сфера деятельности КГМС была расширена в 1992 г., охватив полярно-орбитальные метеорологические спутники, и сейчас КГМС все в большей степени включает в себя основные климатические наблюдения. Согласованная базовая конфигурация описывает спутниковые программы, которые должны поддерживаться на орбите на долгосрочной основе; она служит ориентиром для планируемых вкладов стран-членов в ГСН с учетом концепции ВМО по развитию ГСН до 2025 г. КГМС определяет технические стандарты или наилучшие методические рекомендации для обеспечения оперативной совместимости по всей глобальной системе. Она разработала планы на случай непредвиденных ситуаций, которые предоставляют рамочную основу для действий в случае выхода из строя спутника или других непредвиденных трудностей в полноценном осуществлении согласованной базовой конфигурации.

Координационная группа по метеорологическим спутникам осуществляет работу через рабочие группы по следующим вопросам: i) спутниковые системы и телесвязь; ii) спутниковая продукция; iii) планирование для обеспечения непрерывности наблюдений и на случай непредвиденных ситуаций; iv) глобальное распространение данных. Совместно с ВМО КГМС инициирует сотрудничество в рамках основных программ, к числу которых относятся Глобальная космическая система взаимных калибровок (ГСКИС), Проект по непрерывной скоординированной обработке спутниковых данных об окружающей среде для мониторинга климата (СКОПЕ-КМ) и Виртуальная лаборатория для образования и подготовки кадров в области спутниковой метеорологии. КГМС работает в партнерстве с несколькими международными научными группами, действующими на непрерывной основе, и помогает организовывать раз в два года совещания следующих рабочих групп:

- a) Международная рабочая группа по прибору TIROS для оперативного вертикального зондирования (ТОВС);
- b) Международная рабочая группа по ветрам;
- c) Международная рабочая группа по осадкам;
- d) Международная рабочая группа по радиозатменным наблюдениям.

7.2.2 Комитет по спутниковым наблюдениям за Землей

Комитет по спутниковым наблюдениям за Землей (КЕОС) был основан в 1984 г. «Группой 7» (наиболее промышленно развитые страны мира). В отличие от КГМС, КЕОС на первом этапе уделял особое внимание спутникам для наблюдения за поверхностью суши (первоначально Landsat, затем также экспериментальный спутник для наблюдений за Землей (SPOT) и индийский спутник дистанционного зондирования (IRS)), особенно на основе новых технологий, таких как радиолокаторы с синтезированной апертурой. Позже сфера деятельности КЕОС распространилась на все программы наблюдений за Землей, но с меньшим акцентом на метеорологию до тех пор, пока не проявился интерес к проблемам климата. Со времени учреждения КЕОС вопросы калибровки и проверки качества данных относились к одному из важных направлений деятельности и рассматривались Рабочей

группой по калибровке и валидации. Другими рабочими группами КЕОС являются Рабочая группа по информационным системам и обслуживанию, Рабочая группа по наращиванию потенциала и демократизации данных и новая Рабочая группа по климату.

Координационная деятельность КЕОС в настоящее время осуществляется, главным образом, вокруг концепции группировок спутников в целях обмена опытом в разработке алгоритмов, стандартизации продукции и форматов представления данных, обмена информацией в отношении калибровки и проверки качества данных измерений, оказания содействия своевременному обмену продукцией на основе данных и обеспечению доступа к этой продукции, полученной от существующих и планируемых программ наблюдений, и содействия планирования новых программ. В настоящее время существует семь виртуальных группировок спутников:

- a) состав атмосферы;
- b) изображения поверхности суши;
- c) топография поверхности океана;
- d) атмосферные осадки;
- e) радиометрические наблюдения за цветностью океана;
- f) наблюдения за ветром как вектором на поверхности океана;
- g) наблюдения за температурой поверхности моря.

7.3 ПЛАНИРОВАНИЕ СПУТНИКОВЫХ ПРОГРАММ НАБЛЮДЕНИЙ

7.3.1 Срок эксплуатации спутниковой программы

На заре спутниковой метеорологии срок эксплуатации спутниковой программы составлял всего несколько лет. Стадии определения задач, проектирования спутника, системной разработки и научной аргументации занимали от одного года до двух лет каждая; период эксплуатации был короткий и наземный сегмент часто недостаточно развит.

В настоящее время оперативная программа (например для метеорологических задач) обычно проходит следующие стадии:

стадия 0: определение требований пользователей с привлечением сообщества пользователей и определение требований к космическому аппарату, т. е. выбор возможных технических средств для выполнения требований пользователей. Этот этап длится около 3–4 лет;

стадия А: техническое предложение на системном уровне (включая предварительную спецификацию наземного сегмента) и ответственные приборы (возможно, включая моделирование работы приборов); оценка приблизительного порядка величины расходов на программу. Продолжительность этапа — около двух лет;

стадия В: предварительное проектирование, подготовительная деятельность (включая мероприятия по осуществлению испытаний с установкой на летательных аппаратах), подробная оценка необходимых затрат. Эта стадия занимает еще около двух лет;

стадия С: рабочее проектирование и разработка и испытание всех систем (включая наземный сегмент) и подсистем. Этот этап является самым продолжительным, требующим около пяти лет;

стадия D: сведение в единое целое всех подсистем, испытания всего спутника и кампания по его запуску. Эта стадия часто завершается за один год.

Добавим время на принятие решения и процедуры утверждения программы, на запуск и введение спутника в эксплуатацию — полученная продолжительность разработки программы составляет порядка 15 лет.

стадия E: этап эксплуатации, как правило, ориентирован на 15-летний период для оперативных программ, включая запуск серии из трех или четырех спутников с некоторым перекрытием на случай расчетной нештатной ситуации (обычно срок эксплуатации низкоорбитального спутника составляет пять лет, а геостационарного спутника — 7 лет). Продолжительность эксплуатации поколения спутников является следствием компромисса между необходимостью окупить расходы на разработку программы и накопить опыт использования полученных данных и необходимостью разработать новое поколение спутниковых приборов для того, чтобы воспользоваться преимуществами самых современных технологий.

В организации спутниковой программы принимает участие множество заинтересованных сторон: сообщество пользователей данных, научно-исследовательские институты, космические агентства в части проведения научных исследований и опытно-конструкторских разработок, промышленность и правительственные учреждения с учетом их промышленной политики и бюджетных ограничений. В случае программ для наблюдения за Землей с глобальным охватом обязательно должна осуществляться координация с международными партнерами, что может еще больше усложнить процесс принятия решения.

7.3.2 **Планирование с целью обеспечения непрерывности наблюдений и на случай непредвиденных ситуаций**

Непрерывность наблюдений была важнейшим требованием для метеорологических спутниковых группировок на геостационарной орбите с тех пор, как прогнозы текущей погоды и явлений суровой погоды, включая предупреждения о тропических циклонах, стали опираться на данные мониторинга со спутников. Оперативная непрерывность поступления полученных с геостационарных спутников изображений предусматривает круглосуточный режим работы, высокую степень доступности, распространение данных почти в реальном масштабе времени и долгосрочную непрерывность наблюдений, гарантированную надежной программой, которая включает в себя возможности поддержки для орбитальных резервных средств. Когда была создана полярно-орбитальная спутниковая группировка, и модели численного прогнозирования погоды стали полагаться все в большей степени на спутниковое зондирование (инфракрасное, микроволновое и радиозатменное) и другие основные виды спутниковых наблюдений, например за ветром у поверхности моря, такие же требования к оперативной непрерывности наблюдений стали применяться в отношении утренних и полуденных спутников, составляющих ядро группировки метеорологических спутников на полярной орбите. Спутниковые операторы, принимающие участие в программах ВМО, определили базовую конфигурацию оперативной космической системы наблюдений и обязались ее соблюдать.

Одновременно со спутниковыми операторами, обязавшимися предпринять все необходимые усилия для поддержания геостационарной и полярной солнечно-синхронной группировок спутников, КГМС подготовила Глобальный план на случай непредвиденных ситуаций (см. раздел 7.2.1 и вставку внизу), обеспечивающий техническую и юридическую рамочную основу для принятия мер в случае непредвиденных обстоятельств, которые предусматривают реализацию принципа «окажи помощь своему соседу» в случае отсутствия одного из элементов оперативной конфигурации.

Для геостационарных спутников поддержка при возникновении непредвиденной ситуации может быть оказана в том случае, если имеется достаточно большое количество

спутников, и их номинальное местоположение на орбите находится на равном расстоянии друг от друга вдоль линии экватора (см., например, настоящий том, глава 4, рисунок 4.1). Перемещение спутника с одной долготы на другую требует расходования небольшого количества топлива, если движение осуществляется на малой скорости. В соответствии с планом на случай непредвиденных обстоятельств несколько спутников поддерживается на резервных позициях на орбите, и можно переместить спутник для заполнения пробела путем совершения маневра в течение нескольких дней или недель, в зависимости от срочности и наличия топлива на борту спутника. Было несколько примеров такого замещения: резервный спутник Meteosat был перемещен для заполнения пробела на орбите над западной частью Атлантического океана, когда система геостационарных оперативных спутников для исследования окружающей среды (GOES) недосчиталась спутника из-за задержки с запуском на орбиту в начале 1990-х годов; резервный спутник GOES заполнил пробел на орбите над западной частью Тихого океана во время переходного периода от геостационарного метеорологического спутника (ГМС) к многофункциональному транспортному спутнику (МТСАТ) в начале 2000-х годов; и над Индийским океаном закрывалась позиция в последние двадцать лет спутниками GOES и Meteosat.

Для спутников, расположенных на солнечно-синхронных орбитах, реализация действий на случай непредвиденных ситуаций является более сложной задачей. Изменение плоскости орбиты спутника требует очень большого количества топлива и поэтому не предусматривается, если не считать естественного дрейфа плоскости орбиты из-за прецессии или маневрирования с целью корректировки такого дрейфа и удержания спутника на орбите. Поэтому план на случай непредвиденных ситуаций нацелен на обеспечение наличия резервных спутников в каждой орбитальной плоскости наряду с равномерным распределением этих плоскостей по времени пересечения экватора.

Когда ВМО приняла Концепцию для развития ГСН до 2025 г., сфера деятельности оперативной космической системы наблюдений была расширена и распространилась на климатический мониторинг, отражая тем самым как потребности в мониторинге климата на постоянной основе, так и уровень развития космических систем, перешедших из стадии исследовательских и опытно-конструкторских разработок в стадию с оперативным статусом работы. В ответ на это КГМС последовательно сформулировала и одобрила новую базовую конфигурацию, которая объединила в себе ряд спутниковых программ климатической направленности. Непрерывность климатического мониторинга столь же важна, как и для оперативного прогнозирования погоды; однако требования к наблюдениям различаются, поскольку климатический мониторинг затрагивает различные временные масштабы. Во-первых, доступность данных практически в режиме реального времени и краткосрочные пробелы в дневном цикле не являются основными требованиями. Во-вторых, большое значение придается долгосрочной непрерывности и стабильности проведения измерений на протяжении десятилетий. Принципы климатического мониторинга Глобальной системы наблюдений за климатом (ГСНК) требуют систематического перекрытия зон охвата наблюдениями между всеми последовательно расположенными на орбите спутниками для того, чтобы провести взаимные сравнения и обеспечить сопоставимость результатов измерений. Стабильность и сопоставимость полученных данных может быть также достигнута за счет поддержания на орбите одного в высшей степени защищенного контрольного космического аппарата в качестве резерва на орбите, который может служить контрольным эталоном для калибровки всех других (как уже рассматривалось в настоящем томе, глава 6, 6.1.9). Такой резерв следует рассматривать в качестве главного элемента при определении Архитектуры для мониторинга климата из космоса.

Планирование КГМС с целью обеспечения непрерывности наблюдений и на случай непредвиденных ситуаций

Принятая КГМС базовая конфигурация определяет i) геостационарную группировку из шести спутников, расположенных на фиксированных долготах (135° з. д., 75° з. д., 0°, 76° в. д., 105° в. д., 140° в. д.) и выполняющих ряд согласованных задач; ii) главную метеорологическую спутниковую группировку на полярной солнечно-синхронной орбите, представляющую данные в виде снимков и данные зондирования; iii) различные группировки, предназначенные для дополнительных программ, с размещением спутников на солнечно-синхронных или наклоненных низких околоземных орбитах. Рабочая группа КГМС по планированию для обеспечения непрерывности наблюдений и на случай нештатных ситуаций постоянно проводит анализ осуществления базовой конфигурации, наличия на орбите резервных спутников и рисков прерывания главных программ наблюдения.

Координационная группа по метеорологическим спутникам приняла Глобальный план на случай непредвиденных ситуаций, который включает в себя руководящие указания для обеспечения непрерывности наблюдений, например в отношении реализации политики поддержания на орбите резервных ресурсов и осуществления повторного запуска спутника, набор критериев для введения в действие режима на случай нештатных ситуаций, и устанавливает перечень действий, которые должны быть предприняты в таких непредвиденных ситуациях. В частности, Глобальный план на случай непредвиденных ситуаций устанавливает стандартную процедуру для перемещения резервного геостационарного спутника на место вышедшего спутника, которая известна как стратегия «оказания помощи своему соседу». Этот глобальный план дополняется двусторонними соглашениями между операторами геостационарных спутников на случай нештатных ситуаций. В ряде случаев за последние три десятилетия подобные передислокации спутников при нештатных ситуациях имели существенное значение для сохранения непрерывности наблюдений с крайне необходимых оперативных космических аппаратов.

7.3.3 Долгосрочная эволюция

Эволюционирующие потребности пользователей в отношении спутниковых данных и значительный прогресс в развитии космической техники и технологии дистанционного зондирования требуют непрерывного совершенствования спутниковых систем и измерительной аппаратуры.

В то же время острая нехватка ресурсов подчеркивает необходимость стремиться к оптимизации глобальных усилий по обеспечению наличия комплексной наблюдательной системы и к тому, чтобы избегать ненужного резервирования ресурсов сверх того, что требуется для обеспечения надежности работы. Оптимизация также необходима при разработке, проверке достоверности и непрерывной обработке получаемой продукции и требует обмена данными, оперативной совместимости и обеспечения качества. Глобальная координация под эгидой ВМО направлена на обеспечение такой оптимизации в общем контексте Интегрированной глобальной системы наблюдений ВМО, опираясь на Регулярный обзор потребностей, руководящие указания высокого уровня, предоставляемые в рамках Концепции развития ГСН, заявления о руководящих принципах в каждой из областей применения и План осуществления эволюции глобальных систем наблюдений, который вобрал в себя рекомендации исполнителям, отвечающим за осуществление систем наблюдений. Важной инициативой является также Архитектура для мониторинга климата из космоса, поддержанная ВМО, КЕОС и КГМС, с целью обеспечения непрерывного реагирования со стороны космической системы наблюдений на требования к климатическому мониторингу.

СПРАВОЧНАЯ И ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

- Bizzarri, B., 1982: Satellite data for numerical weather prediction. *Rivista di Meteorologia Aeronautica*, 42(4):369–382.
- , 1986: Basic principles of remote sensing. *Proceedings of the Course on Satellite Meteorology and its Extension to Agriculture* (Erice, ed.). EUMETSAT, EUM P03, pp. 1–10.
- Bizzarri, B. and C. Tomassini, 1976: Retrieval of information from high-resolution images. *Proceedings of the Symposium on Meteorological Observations from Space*, Committee on Space Research, Philadelphia, pp. 140–144.
- Chander, G., T.J. Hewison, N. Fox, X. Wu, X. Xiong and W.J. Blackwell, 2013: Overview of intercalibration of satellite instruments. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 51(3):1056–1080.
- Committee on Earth Observation Satellites: Mission, Instruments and Measurements database online (available from <http://database.eohandbook.com>, updated yearly).
- Datla, R.V., J.P. Rice, K.R. Lykke, C. Johnson, J.J. Butler and X. Xiong, 2009: *Best Practice Guidelines for Pre-launch Characterization and Calibration of Instruments for Passive Optical Remote Sensing*. NIST IR 7637, National Institute of Standards and Technology.
- European Space Agency: Sharing Earth Observation Resources (available from <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions>, updated at intervals).
- Fox, N., 2010: QA4EO – A Quality Assurance Framework for Earth Observation: A guide to “reference standards” in support of Quality Assurance requirements of GEO (M.C. Greening, ed.). QA4EO-QAEO-GEN-DQK-003, Group on Earth Observations (available from http://www.qa4eo.org/docs/QA4EO-QAEO-GEN-DQK-003_v4.0.pdf).
- Joint Committee for Guides in Metrology, 2012: *International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM)*. JCGM 200:2012.
- Klein, M. and A.J. Gasiewski, 2000: Nadir sensitivity of passive millimeter and submillimeter wave channels to clear air temperature and water vapor variations. *Journal of Geophysical Research*, 105(D13):17481–17511.
- Kramer, H.J., 2002: *Observation of the Earth and its Environment – Survey of Missions and Sensors*, Springer (CD-ROM inclusive of survey on airborne sensors and campaigns).
- Ohring, G. (ed.), 2007: *Achieving Satellite Instrument Calibration for Climate Change (ASIC³)*. Report of a workshop organized by the National Oceanic and Atmospheric Administration, National Institute of Standards and Technology, National Aeronautics and Space Administration, National Polar-orbiting Operational Environmental Satellite System-integrated Program Office, and Space Dynamics Laboratory of Utah State University, 16–18 May 2006. Landsdowne, VA.
- Parkinson, C.L., A. Ward and M.D. King (eds.), 2006: *Earth Science Reference Handbook*. NASA Goddard Space Flight Center.
- Tobin, D.C., H.E. Revercomb, R.O. Knuteson, F.A. Best, W.L. Smith, N.N. Ciganovich, R.G. Dedecker, S. Dutcher, S.D. Ellington, R.K. Garcia, H.B. Howell, D.D. LaPorte, S.A. Mango, T.S. Pagano, J.K. Taylor, P. van Delst, K.H. Vinson and M.W. Werner, 2006a: Radiometric and spectral validation of Atmospheric Infrared Sounder observations with the aircraft-based Scanning High-Resolution Interferometer Sounder. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 111(D09S02).
- Tobin, D.C., H.E. Revercomb, C.C. Moeller and T.S. Pagano, 2006b: Use of Atmospheric Infrared Sounder high-spectral resolution spectra to assess the calibration of Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer on EOS Aqua. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 111(D09S05).
- World Meteorological Organization, 2001: *Applications with Meteorological Satellites* (W.P. Menzel). SAT-28 (WMO/TD-No. 1078). Geneva.
- , 2014: Observing Systems Capability Analysis and Review (OSCAR) database and tool (available from <http://www.wmo-sat.info/oscar/>, regularly updated).
- World Meteorological Organization/International Telecommunication Union, 2008: *Handbook on Use of Radio Spectrum for Meteorology: Weather, Water and Climate Monitoring and Prediction*. Geneva.
-