

РЕКОМЕНДАЦИЯ МСЭ-R RS.577-7

Полосы частот и требуемые значения ширины полосы, используемые для космических активных датчиков, функционирующих в спутниковой службе исследования Земли (активной) и в службе космических исследований (активной)

(1982-1986-1990-1994-1995-1997-2006-2009)

Сфера применения

В данной Рекомендации приводятся полосы частот и значения ширины полосы для пяти основных типов космических активных датчиков. Хотя рассуждения в Приложении 1 по большей части касаются наблюдения Земли, в целом считается, что методы измерения также подходят и для других планет. Поэтому в данной Рекомендации рассматриваются как спутниковая служба исследования Земли (активная), так и служба космических исследований (активная).

Ассамблея радиосвязи МСЭ,

учитывая,

- a) что космические активные микроволновые датчики могут предоставлять уникальную информацию о физических свойствах Земли и других планет;
- b) что для зондирования различных физических свойств необходимо использовать различные частоты;
- c) что пространственное разрешение измерения определяет требуемую ширину полосы;
- d) что при одновременном измерении на нескольких частотах часто бывает необходимо разграничивать различные характеристики;
- e) что обычно возможно совместное использование частот космическими активными микроволновыми датчиками, функционирующими в спутниковой службе исследования Земли (активной) и службе космических исследований (активной), и наземными радарными, функционирующими в радиолокационной службе,

рекомендует,

1 чтобы полосы частот и требуемые значения ширины полосы для космического активного зондирования соответствовали Приложению 1;

2 чтобы полосы частот и ширина полосы, приведенные в таблице 1, использовались для измерений при активном зондирования Земли на предмет:

- влажности почвы;
- картографирования растительности;
- распределения снега, глубины и содержания воды;
- геологического картографирования;
- картографирования землепользования;
- границ льда, его глубины, типа и возраста;
- структуры океанских волн;
- скорости и направления океанских ветров;

- картографирования океанической циркуляции (течений и вихрей);
- разливов нефти;
- геодезического картографирования;
- интенсивности дождей;
- высоты и густоты облаков;
- приземного/приводного давления;
- измерения биомассы в тропических лесах;
- др.

ТАБЛИЦА 1

Полоса частот, как распределено в Статье 5 Регламента радиосвязи	Ширина полосы применения				
	Рефлектометр	Высотомер	Формиро- ватель изображения	Радар контроля осадков	Радар профи- лирования облачности
432–438 МГц			6 МГц		
1 215–1 300 МГц	5–500 кГц		20–85 МГц		
3 100–3 300 МГц		200 МГц	20–200 МГц		
5 250–5 570 МГц	5–500 кГц	320 МГц	20–320 МГц		
8 550–8 650 МГц	5–500 кГц	100 МГц	20–100 МГц		
9 300–9 900 МГц ⁽¹⁾	5–500 кГц	300 МГц	20–600 МГц		
13,25–13,75 ГГц	5–500 кГц	500 МГц		0,6–14 МГц	
17,2–17,3 ГГц	5–500 кГц			0,6–14 МГц	
24,05–24,25 ГГц				0,6–14 МГц	
35,5–36 ГГц	5–500 кГц	500 МГц		0,6–14 МГц	
78–79 ГГц					0,3–10 МГц
94–94,1 ГГц					0,3–10 МГц
133,5–134 ГГц					0,3–10 МГц
237,9–238 ГГц					0,3–10 МГц

⁽¹⁾ См. соответствующее решение ВКР-07.

Приложение 1

Факторы, связанные с определением полос частот и требуемой ширины полосы для космического активного зондирования

1 Введение

Активные датчики отличаются от пассивных тем, что они освещают изучаемый объект и реагируют на отраженную энергию.

Существует 5 основных типов активных датчиков:

- рефлектометры;
- высотомеры;
- формирователи изображения (радары с синтезируемой апертурой);
- радары контроля осадков;
- радары профилирования облачности.

Радиолокационные рефлектометры удобны для определения неровности поверхности больших объектов. При работе на частотах выше 300 МГц рефлектометр измеряет величину обратного рассеивания от неровностей поверхности в широком диапазоне от гладких до очень неровных. На частотах около 200 МГц отражательная способность главным образом зависит от электропроводности. Эти более низкие частоты можно использовать для проникновения сквозь поверхность Земли для обнаружения подземных структур.

Радиолокационная альтиметрия располагает тремя возможными принципами работы для практических систем. Один из этих методов основывается на использовании очень узкой ширины луча (2 мрад) и очень короткого передаваемого импульса (2 нс). Для получения информации по высоте используется измерение времени двусторонней задержки переднего фронта передаваемого импульса. С методом короткого импульса схож метод сжатия импульса. Короткий динамический импульс генерирует более длинный частотно-модулированный импульс, а обратный сигнал, имеющий большую ширину полосы, снова сжимается в короткий импульс, который затем распознается по переднему фронту. Для третьего метода требуется средний размер антенны и стабилизация космического летательного аппарата, причем радиолокационный обратный сигнал радара с точки надира получается при помощи метода временной селекции. В данном методе информация по высоте извлекается путем измерения центроида начальной части радиолокационной формы сигнала, а не переднего фронта очень короткого импульса.

Системы радиолокационного формирования изображения используются для создания изображений высокого разрешения, необходимые в таких областях, как геология, океанография и сельское хозяйство. Для получения подходящего разрешения из космоса для многочисленных целей используются фокусированные радары с синтезированной апертурой (РСА), поскольку их разрешение не зависит от диапазона. В области метеорологического сканирования также могут использоваться доплеровские радары.

Информация о глобальном количестве осадков и распределении облаков необходима для понимания и предсказания глобальных изменений климата. Микроволновые датчики имеют явное преимущество перед датчиками видимого/инфракрасного излучения, потому что они обладают способностью проникать через облачный покров, таким образом предоставляя прямую информацию о дожде и объеме облаков. Активные датчики особенно важны, потому что они являются единственными приборами, предоставляющими информацию о вертикальной структуре дождя и облаков. Таким образом, они необходимы для изучения масштабной циркуляции воздуха и радиационного баланса. Более того, активные датчики могут предоставлять количественную информацию о дожде и облаках независимо от свойств микроволнового излучения фоновых поверхностей.

Активное удаленное зондирование в микроволновом диапазоне дает несколько преимуществ по сравнению с датчиками видимой части спектра и пассивными микроволновыми датчиками. Кроме того, что активные датчики обладают уникальной чувствительностью к некоторым меняющимся параметрам суши/океана/атмосферы (например, влажности растительности и высоте облаков), активное зондирование дает возможность, например, проникать сквозь поверхность и растительность, работать при любой погоде, в режиме день/ночь, достигать высокого пространственного разрешения (радар с синтезируемой апертурой (РСА)), улучшать характеристики путем изменения угла освещения и функционировать в широком спектральном диапазоне вне зависимости от излучений от узкополосных явлений.

Активные датчики освещают изучаемый объект и реагируют на отраженную энергию. Для того чтобы собрать информацию о поверхности Земли из космоса, передаваемый сигнал должен пройти через атмосферу дважды. В результате электромагнитное поглощение и рассеивающие свойства атмосферы играют важную роль в определении спектральных диапазонов, подходящих для активных удаленных датчиков.

Сильное атмосферное затухание ограничено более короткими длинами волн, и поэтому активные датчики обычно работают ниже диапазона поглощения кислорода 60 ГГц, а также избегают спектрального диапазона около линии водяного пара 22 ГГц.

Электромагнитное рассеивание осадками и облаками может представлять более серьезную проблему, чем поглощение атмосферой. Эхо от капелек воды увеличивается с возрастанием диаметра капель и снижается с увеличением длины волны. Таким образом, при большей длине волны облака дают небольшое эхо, но осадки могут вызвать более сильное эхо из-за большого диаметра капель воды.

Ниже приводятся некоторые аспекты исследований с помощью активных датчиков, в частности то, что относится к выбору частот для измерения меняющихся параметров на Земле с космической платформы. Следует заметить, что из-за широкого частотного диапазона отклика различных исследуемых явлений при определении оптимальных частот часто появляется необходимость в одновременном измерении на нескольких частотах так, чтобы можно было разделить данные ответа радара от разных источников.

Ответ радара от любой поверхности – это результат частоты радара, неровности поверхности, диэлектрических свойств поверхности, угла падения и ориентации и подповерхностной микроструктуры. В каждом из перечисленных применений энергия, отраженная к датчику радара, подвергается сильному влиянию по крайней мере одного механизма обратного рассеивания, относящегося к измеряемому явлению. В общем, к таким механизмам относятся: неспокойное состояние океана (используется при изучении структуры океана и ветров над поверхностью моря); поглощение O_2 (используется при определении приводного давления над океаном); и неровность поверхности и изменение диэлектрической постоянной (используется при изучении льдов, снега и параметров суши).

2 Активное зондирование океана и океанских ветров

В активном зондировании океана преобладает определение структуры волн, измерение ветров над поверхностью моря и исследования океанических течений. Как правило, отражение микроволновой энергии возникает из-за неспокойного состояния моря, а именно: ответ радара – это результат эффекта дифракции как от больших гравитационных волн и маленьких капиллярных волн поверхностного натяжения, возникающих на больших волнах, так и от пены. Количество отраженного излучения в результате каждого из этих эффектов, наблюдаемое активным датчиком, зависит от состояния моря и особенностей метода измерения.

Работа на нескольких частотах в диапазоне 3–30 ГГц показала, что эффекты больших гравитационных волн доминируют при почти перпендикулярном падении луча, а эффекты капиллярных волн – при угле падения более 20° . Таким образом, чтобы изучить состояние моря (функция ряби, очень зависимой от бриза) и размер и направление стабильных гравитационных волн (грубая структура моря), используется концепция двустороннего компонента. При изучении ветров над поверхностью океана (важных в моделях предсказания погоды) основным принципом является то, что неспокойное состояние моря является критерием, на основании которого можно сделать вывод о переменных параметрах ветра, поскольку небольшие элементы неспокойствия, которые передают переход кинетической энергии от ветра к морю находятся по крайней мере почти в равновесии с ветром.

Используя различные частоты, поляризации и углы падения, исследователи могут сделать вывод об особенностях ветров над поверхностью океана, существенной высоте волн и среднеквадратичном значении склонов волны, то, чего невозможно достичь при пассивном зондировании. Эксперименты показали, что хорошая чувствительность к силе ветра достигается при частотах около 14 ГГц, а при частоте 1,3 ГГц чувствительность к ветру снижается.

РСА показали хорошие результаты при измерении грубой структуры моря (средней существенной высоты волн). Одна модель использует четыре полосы частот в диапазоне 1–10 ГГц и три поляризации с возможностями широкой полосы (wide-swath) и многочисленными углами падения. Нефтяные пленки в океане подавляют океанические волны с короткой длиной волны, поэтому загрязненный участок можно будет отличить от чистого участка вокруг при помощи микроволновых радиолокационных формирователей изображения.

Высотомеры успешно используются на нескольких спутниках над океанами мира. Для океанографических исследований требуется система измерения высоты с точностью измерений полного диапазона до 2 см. Для достижения точности в 2 см необходимо ликвидировать ошибки диапазона, возникающие из-за содержания электронов в ионосфере, которое может вызвать ошибки до 22 см при частоте 13,5 ГГц. Двухчастотная система измерения высоты может устранить неточность диапазона, возникающую из-за ионосферы. Двухчастотная система измерения высоты может также обеспечить точные измерения продолжительных полос содержания электронов в ионосфере, измерения, проводить которые над большой поверхностью океанов Земли сейчас не представляется возможным. Для второй частоты подойдет участок спектра, удаленный более чем на октаву от полосы 13,25–13,75 ГГц. Можно выбрать вторую частоту около 5 ГГц, при этом основная частота остается около 14 ГГц. Считается, что в дальнейшем будут также использоваться более высокие частоты около 35 ГГц.

Таким образом, можно считать, что для активного удаленного зондирования структуры океанских волн полезными оказались несколько частот. Благодаря динамическому диапазону высокой скорости ветра и относительному отсутствию атмосферных эффектов, технология измерения скорости ветра сошла на участке 10–15 ГГц.

3 Активное зондирование поверхностей, покрытых льдом

Исследования показывают, что активному микроволновому зондированию поддаются в различной степени следующие типы переменных параметров льда: тип льда (новый, старый и т. п.), неровность поверхности, концентрация, размер и количество плавучих льдов, трещины, дрейфовые течения (drift), топология поверхности, показатели давления, толщина и изменения типа и распределения типов льда. На основе этих исследований можно утверждать, что наилучшей для определения типа морского льда является частота между 3–30 ГГц. Частота датчика в диапазоне 0,3–3 ГГц полезна при устранении неточностей, возникающих при измерении тонкого льда, особенно при использовании вместе с радаром, работающими в диапазоне 3–30 ГГц. Более высокие частоты также являются предметом рассмотрения.

Наиболее важными космическими активными микроволновыми датчиками для изучения морских льдов являются РСА, радиолокационный высотомер и радиолокационный рефлектометр. Исследование морского льда со спутника выполняется в основном РСА на частоте 1,3 ГГц. Воздушный радиолокационный формирователь изображения с синтезируемой апертурой (1,3 и 9,6 ГГц) показал, что в некоторых случаях, включая картографирование морского льда, предпочтителен канал с более высокой частотой. Хотя интерпретируемость получения изображения морского льда не улучшается при более высоких частотах, эффективность работы на частоте 1,3 ГГц не вызывает сомнений. Высотомеры используются для картографирования параметров морского льда и высоты ледникового покрова Гренландии.

В настоящее время удаленное зондирование Земли из космоса в целом ограничено тонким поверхностным слоем, в то время как для измерения многих параметров, относящихся к климату, ресурсам Земли и мониторингу риска, требуется информация с больших глубин. Работа радаров на частоте около 435 МГц при определенных обстоятельствах позволяет формировать изображение, проникая сквозь слои льда до основания (камня), на глубину более 4 км. Для моделирования глобальной динамики ледового щита и баланса массы (накопление снега и потерь из-за таяния и образования айсбергов (отрыва айсбергов от ледниковой массы) на продолжительные периоды (100 – несколько 100 000 лет) необходимо иметь полный охват ледникового щита Антарктики

наблюдениями однородного качества, что можно достичь при использовании космической платформы, использующей подобный зонд льда надира.

4 Метеорологические и климатологические наблюдения

Знания, полученные в ходе измерений с земли и воздуха о количестве осадков, свойствах ураганов и полях давления в моделях предсказания погоды, также были расширены за счет космических систем. Методы основываются на изменениях коэффициента преломления чистой атмосферы из-за характеристик, относящихся к дождю или дифференциальных коэффициентов отражения многочастотных эхо. В ходе исследований, проводившихся с ортогонально поляризованными радарными и охватом многочисленными узкими лучами на нескольких частотах между 2 и 37,5 ГГц, стало возможным измерить уровень выпадения осадков, интенсивность, пространственное распределение, размер капель и поверхностное давление над океаном и движения ветра при ураганах. Существует несколько факторов, ограничивающих выбор частот. Комбинация частотных полос должна быть выбрана таким образом, чтобы она соответствовала минимальной чувствительности и пространственному разрешению, но не заглушалась эхо-сигналом от земной поверхности на необходимых углах обзора. Только сканирующие направленные вниз узкие лучи (в противопоставление азимутальным или боковым веерным лучам) обладают способностью вывести интенсивность осадков из оценки высотометром замерзающего слоя. Одночастотный и многочастотный подходы к измерению затухания радиоволн в дожде, а также отражательная способность радаров имеют способность к количественному определению вертикальных профилей осадков от спутников.

Частота около 94 ГГц является предпочтительной и используется для космических радаров профилирования облаков на основании следующих факторов: минимальная распознаваемая отражательная способность облаков, распространение и рассеивание, разрешение, помехи луча антенны, ранее проделанная работа и использовавшийся метод. Отражательная способность морских слоистых облаков, которые являются очень важными для определения радиационного баланса Земли, может составлять -30 dBZ, уровень на 70 дБ ниже отражательной способности дождя (10 мм/ч). Целью космического профилирования облаков является измерение профиля отражающей способности для всех облаков в пределах поля зрения, имеющих отражающую способность более 30 dBZ. Частота около 94 ГГц необходима для измерения этого уровня отражающей способности, а также для достижения целей разрешения следа. На частоте около 94 ГГц было выполнено большое количество экспериментальной работы по развитию наземных и воздушных радиолокационных систем и сбору данных. Наряду с развитием аппаратных средств проводилась работа по вычислению, целью которой являлось изучение функционирования нерелеевских рефлектометров на частоте около 94 ГГц.

5 Активное зондирование растительного покрова и влажности почвы

Интерес к активному зондированию влажности почвы возник из-за ограниченного пространственного разрешения пассивных датчиков. Количество радиолокационной энергии, отраженной от почвы, зависит от неровности почвы и диэлектрической постоянной, растительного покрова и угла падения передаваемого микроволнового луча. Предварительные лабораторные исследования показали, что влажность почвы оказывает влияние на отражательную способность почвы из-за изменения диэлектрической постоянной. Углы падения менее 45° могут помочь отличить отраженные сигналы по неровности и отраженные сигналы по влажности. Исследование, в котором использовались частоты 4,7; 5,9 и 13,3 ГГц, показывает, что система спутникового рефлектометра при работе на частоте 4,7 ГГц и углами падения от 5° до 17° может адекватно различать отраженные сигналы по влажности почвы от отраженных сигналов по растительному покрову и неровности. Однако когда растительный покров является фактором или когда требуются подпочвенные измерения, необходимы дополнительные частоты.

С другой стороны, растительный покров может являться целью исследования, особенно в экспериментах по идентификации посевов, при которых сигналы, отраженные от почвы, становятся помехой. Используются как формирователи изображения, так и рефлектометры, причем энергия, отраженная от растительности, относится к неровности, влажности, диэлектрической постоянной растительности и углу обзора. Результаты данных исследований показывают, что спутники могут быть полезными в идентификации активными датчиками посевов и лесов, схемы использования земель (пастбище, лес и т. д.) и параметров водораздела. Многоспектральные, многополяри-

зационные, многовременные схемы наблюдения при больших углах падения (для уменьшения отраженных сигналов от почвы до минимума) принесли многообещающие результаты на частотах 1,3; 5,9; 9,0; 9,4; 13; 16 и 35 ГГц. Классификацию посевов можно улучшить, приняв во внимание периоды роста, задействовав несколько частот и повторив измерения через несколько недель.

Благодаря большому проникновению в густую растительность и большому количеству информации по рассеиванию при частоте около 400 МГц, воздушные радары с частотой около 400 МГц используются в тропических районах, где растительность обычно чрезвычайно густая, для содействия измерению древесной биомассы в тропических лесах. Данные радары применяются не только для анализа обезлесения и лесонасаждения, но и для измерения надземной древесной биомассы. На некоторых участках лесов арктического и умеренного пояса данные горизонтальной – горизонтальной, горизонтальной – вертикальной, вертикальной – вертикальной поляризации на частоте около 400 МГц давали оценку общего количества надземной древесной биомассы в пределах от 12% до 27% действительной биомассы, в зависимости от сложности леса. В тропических лесах радар, работающий на частоте около 400 МГц, может участвовать в измерении биомассы леса и давать результаты, достичь которых другими средствами невозможно, даже хотя уровень биомассы значительно превышает значение 20 кг/м².

Проникновение сквозь поверхность при частоте 400 МГц глубже, чем при 1250 МГц в 8–10 раз, поэтому данная частота является наиболее предпочтительной для исследований с проникновением сквозь поверхность Земли. Используя радары – формирователи изображения, представляется возможным документировать геологическую историю и изменения климата в пределах крупнейших пустынь мира, используя карты скрытых речных систем и окружающей их топографии. Также возможно моделировать строение некоторых участков земной коры в полуаридных областях мира, используя карты поверхности и скрытых геологических структур, таких как сдвиги породы, трещины, синклинали и антиклинали.

6 Требования к ширине полосы для активного зондирования

Требования к ширине полосы для активных датчиков варьируются в зависимости от типа датчика, т. е. РСА, радара с реальной апертурой, рефлектометра, высотомера или радара профилирования, дождя или облачности. В любом случае ширина полосы определяется требуемой разрешающей способностью по дальности и равняется:

$$B = \frac{1}{\tau} = \frac{c}{2\Delta R}, \quad (1)$$

где:

B : ширина полосы (Гц);

τ : длительность импульса (эквивалентная обратной величине ширины полосы сжатия импульса) (с);

c : скорость света (м/с);

ΔR : разрешающая способность по дальности луча радара (м).

Следует заметить, что разрешающая способность по дальности на поверхности (или перпендикулярная разрешающая способность) радаров бокового обзора дается выражением $\Delta R/\cos \theta_d$, где θ_d – угол наклона цели от спутника или угол падения на Землю. Например, ширина полосы в 100 МГц дает значение 1,5 м для ΔR , разрешающей способности по дальности по лучу радара, и при угле наклона цели в 60 градусов данная разрешающая способность по дальности на поверхности $\Delta R/\cos \theta_d$ составляет 3 м. При полосе частот 500 МГц, используемой для более высокого разрешения, это дает значение 0,3 м для ΔR , и при угле наклона цели в 60 градусов данная разрешающая способность по дальности на поверхности составляет 0,6 м. В случае с радаром дождя или облачности, когда за короткое время подсветки (цели) в каждой позиции сканирования необходимо получить большое количество независимых образцов, можно применить метод быстрой перестройки частоты. В этом случае для суммарной ширины полосы потребуется $B \times N_f$ или более (N_f – число частотных каналов в системе быстрой смены частоты), принимая во внимание частотное разнесение для сохранения необходимой изоляции между каналами приемника радара.

В заключение следует сказать, что ширина полосы в 100 МГц будет совместима с большей частью применений, рассматриваемых учеными для космических активных микроволновых датчиков, за исключением высотомеров, для которых требуется большие значения ширины полосы.

7 Резюме предпочтительных частот и необходимой ширины полосы для активного зондирования

Хотя методы активного микроволнового зондирования быстро совершенствуются, многое еще надо изучить. Так можно определить ряд полос частот, который удовлетворял бы требованиям к измерениям и обеспечивал бы многочастотные измерения, необходимые для отделения вкладов в сигнал от разных источников. Вопросы совместного использования предписывают, чтобы конкретные полосы частот для активных датчиков находились в полосах, совместно используемых с радиолокационной службой. Таким образом, полосы частоты для измерений с использованием космических активных датчиков находятся на частотах около 435 МГц и около 1, 3, 5, 10, 14, 17, 24, 35, 78, 94, 133 и 238 ГГц. Ширина полосы в 100 МГц подходит для большинства применений, в которых используются приборы активных датчиков, кроме радаров высокого разрешения с синтезируемой апертурой и высотомеров. Для измерений высотомером может потребоваться ширина полосы до 500 МГц для удовлетворения требованиям точности, однако в настоящее время это требование может быть удовлетворено только в полосах, распределенных около 14 и 35 ГГц для активного зондирования. Во второй частотной полосе с шириной 500 МГц может быть достигнута точность до 2 см при использовании высотомеров в океанографии. Другой частотной полосой, полезной для достижения такой точности, является, например, частота около 5 ГГц. При полосе частот 500 МГц, используемой для более высокого разрешения, и при угле наклона цели в 60 градусов данная разрешающая способность по дальности на поверхности составляет меньше метра и равна 0,6 м. Для применений, использующих РСА для измерения влажности почвы и биомассы, для документирования геологической истории и изменений климата путем измерения размеров и толщины глобального ледяного щита и подповерхностного картографирования аридных и полуаридных областей достаточной является минимальная ширина полосы в 6 МГц при частоте около 435 МГц.
