Рекомендация МСЭ-R RS.2042-2

(12/2023)

Серия RS: Системы дистанционного зондирования

Типовые технические и эксплуатационные характеристики систем бортовых космических радиолокационных зондов, использующих полосу 40–50 МГц

**Предисловие**

Роль Сектора радиосвязи заключается в обеспечении рационального, справедливого, эффективного и экономичного использования радиочастотного спектра всеми службами радиосвязи, включая спутниковые службы, и проведении в неограниченном частотном диапазоне исследований, на основании которых принимаются Рекомендации.

Всемирные и региональные конференции радиосвязи и ассамблеи радиосвязи при поддержке исследовательских комиссий выполняют регламентарную и политическую функции Сектора радиосвязи.

**Политика в области прав интеллектуальной собственности (ПИС)**

Политика МСЭ-R в области ПИС излагается в общей патентной политике МСЭ-Т/МСЭ-R/ИСО/МЭК, упоминаемой в Резолюции МСЭ-R 1. Формы, которые владельцам патентов следует использовать для представления патентных заявлений и деклараций о лицензировании, представлены по адресу: <https://www.itu.int/ITU-R/go/patents/en>, где также содержатся Руководящие принципы по выполнению общей патентной политики МСЭ-Т/МСЭ-R/ИСО/МЭК и база данных патентной информации МСЭ-R.

|  |  |
| --- | --- |
| **Серии Рекомендаций МСЭ-R**  (Представлены также в онлайновой форме по адресу: <https://www.itu.int/publ/R-REC/ru>.) | |
| **Серия** | **Название** |
| **BO** | Спутниковое радиовещание |
| **BR** | Запись для производства, архивирования и воспроизведения; пленки для телевидения |
| **BS** | Радиовещательная служба (звуковая) |
| **BT** | Радиовещательная служба (телевизионная) |
| **F** | Фиксированная служба |
| **M** | Подвижные службы, служба радиоопределения, любительская служба и относящиеся к ним спутниковые службы |
| **P** | Распространение радиоволн |
| **RA** | Радиоастрономия |
| **RS** | **Системы дистанционного зондирования** |
| **S** | Фиксированная спутниковая служба |
| **SA** | Космические применения и метеорология |
| **SF** | Совместное использование частот и координация между системами фиксированной спутниковой службы и фиксированной службы |
| **SM** | Управление использованием спектра |
| **SNG** | Спутниковый сбор новостей |
| **TF** | Передача сигналов времени и эталонных частот |
| **V** | Словарь и связанные с ним вопросы |

|  |
| --- |
| ***Примечание****. – Настоящая Рекомендация МСЭ-R утверждена на английском языке в соответствии с процедурой, изложенной в Резолюции МСЭ-R 1.* |

*Электронная публикация*Женева, 2025 г.

© ITU 2025

Все права сохранены. Ни одна из частей данной публикации не может быть воспроизведена с помощью каких бы то ни было средств без предварительного письменного разрешения МСЭ.

РЕКОМЕНДАЦИЯ МСЭ-R RS.2042-2

Типовые технические и эксплуатационные характеристики систем бортовых космических радиолокационных зондов, использующих полосу 40–50 МГц

(2014-2028-2023)

Сфера применения

В настоящей Рекомендации приводятся технические и эксплуатационные характеристики бортового космического радиолокационного зонда, который будет работать в диапазоне частот 40−50 МГц. Эта информация должна использоваться в исследованиях совместимости.

Ключевые слова

Спутниковая служба исследования Земли (активная), бортовой космический активный датчик, радиолокационный зонд, поверхность ледникового ложа, подповерхностные рассеивающие слои, реликтовые водоносные горизонты в пустынных природных средах, радиолокационный зонд неглубокого проникновения (SHARAD).

Соответствующие Рекомендации МСЭ

Отчет МСЭ-R M.2234 "Возможность совместного использования поддиапазонов океанографическими радарами, работающими в радиолокационной службе, а также фиксированной и подвижной службами в диапазоне частот 3–50 МГц".

Отчет МСЭ-R RS.2536 "Исследования совместного использования частот и совместимости, касающиеся радиолокационных зондов на борту космических станций в полосе частот 40−50 МГц ".

Ассамблея радиосвязи МСЭ,

учитывая,

*a)* что бортовые космические радиолокационные зонды могут обеспечивать радиолокационные карты подповерхностных рассеивающих слоев, позволяющие определять местонахождение водных/ледовых отложений, используя активное космическое зондирование;

*b)* что научные задачи полетов заключаются в том, чтобы 1) получить представление об общей толщине, внутренней структуре и термической устойчивости ледниковых щитов Земли (например, в Гренландии и Антарктиде) как о наблюдаемых параметрах изменения климата Земли, а также 2) получить представление о появлении, распределении и динамических свойствах реликтовых водоносных горизонтов в пустынных природных средах (например, в Северной Африке и на Аравийском полуострове) как о важнейших составляющих понимания недавних палеоклиматических изменений;

*c)* что необходимо измерять коэффициент отражения радиоволн от подповерхностных рассеивающих слоев на глубине от 10 м до 100 м для неглубоко залегающих водоносных горизонтов и потоков грунтовых вод и порядка 5 км для топографии базальной поверхности и толщины ледниковых щитов;

*d)* что глубина проникновения длин волн в подповерхностные рассеивающие слои на СВЧ‑волнах увеличивается приблизительно в обратной зависимости от частоты;

*e)* что регулярные измерения подповерхностных отложений воды/льда во всем мире требуют применения активных датчиков на борту космических аппаратов;

*f)* что для удовлетворения всех требований к бортовым космическим радиолокационным зондам желательно использовать диапазон частот 40–50 МГц;

*g)* что полоса 40–50 МГц распределена фиксированной, подвижной и радиовещательной службам на первичной основе;

*h)* что использование полосы частот 40,98–41,015 МГц службой космических исследований осуществляется на вторичной основе;

*i)* что относящиеся к странам примечания к Таблице распределения частот в полосе 40−50 МГц обеспечивают распределения на первичной или вторичной основе радиовещательной, фиксированной и подвижной, воздушной радионавигационной и радиолокационной службам в некоторых частях мира;

*j)* что в Таблице распределения частот для полос, соседних с диапазоном частот 40−50 МГц, приведены распределения на первичной и вторичной основе любительской службе;

*k)* что эксплуатация радиолокационных зондов на борту космических аппаратов за пределами распределений ССИЗ (активной) будет осуществляться в соответствии с пунктом **4.4** РР;

*l)* что полосы шириной 10 МГц достаточно для использования бортовыми космическими радиолокационными зондами;

*m)* что были определены эксплуатационные ограничения, как описано в Приложении 1,

рекомендует,

чтобы приведенные в таблице 1 Приложения характеристики использовались в исследованиях совместного использования частот и совместимости, касающихся радиолокационных зондов на борту космических станций в диапазоне частот 40−50 МГц.

Приложение  
  
Типовые технические и эксплуатационные характеристики систем бортовых космических радиолокационных зондов, использующих полосу 40–50 МГц

# 1 Введение

В сообществе климатологов существует интерес к дистанционному зондированию близких к поверхности слоев земной коры в полосе частот около 40–50 МГц с помощью бортовых космических активных датчиков для получения радиолокационных карт подповерхностных рассеивающих слоев, по которым можно определить места залегания воды, льда и различных отложений, а также исследовать подледные поверхности ледникового ложа. В настоящем Приложении обосновывается выбор предпочтительной полосы частот, а также приводятся типовые технические и эксплуатационные характеристики.

В настоящем Приложении описываются технические и эксплуатационные характеристики бортовых космических активных датчиков, работающих в полосе частот 40–50 МГц.

# 2 Обоснование выбора полосы частот

Основанием для осуществления распределения бортовым космическим зондирующим радарам в диапазоне от 40 МГц до 50 МГц являются следующие критерии выбора: проникновение сквозь поверхность, шкала длин волн наблюдений, область применимости модели электромагнитного рассеяния и ранее проведенная работа.

## 2.1 Проникновение сквозь поверхность

Падающая волна, излучаемая радаром, как правило, проникает в виде волн с несколькими десятками длин. При соответствующих условиях, соответствующих длине волны, и составе рассеивающей среды радиоволны могут свободно проникать сквозь диэлектрические материалы, образующие земную поверхность и земной покров. Количественная оценка глубины проникновения δ*p* получается из следующего выражения:

 (1)

где:

λ0:длина волны;

*e′* и *e″*: действительная и мнимая части диэлектрической проницаемости поверхности.

На рисунке 1 показаны глубины проникновения сквозь поверхность для частот 50 МГц, 500 МГц и 5000 МГц, полученные с использованием этого выражения и значений диэлектрической проницаемости почвы. Из этого рисунка видно, что глубина проникновения сквозь поверхность на частоте 50 МГц в 20–30 раз больше, чем на частоте 500 МГц. Поэтому эта частота наиболее благоприятна для проведения исследований путем проникновения сквозь поверхность Земли. Задачи заключаются в том, чтобы обеспечить радиолокационные карты подповерхностных рассеивающих слоев для определения местоположения водных/ледовых отложений с помощью бортовых космических активных датчиков.

рисунок 1

Глубина проникновения сквозь поверхность



## 2.2 Шкала длин волн наблюдений

Добавление диапазона 50 МГц к существующим диапазонам 435 МГц и 1250 МГц расширило бы пределы шкалы длины волн, на которых наблюдается неровность поверхности. Для многих геологических поверхностей характерно преобладание в обратном рассеянии той гармонической составляющей поверхности, длина волны которой близка к длине волны, излучаемой радаром, или превышает ее. При этом значимость других составляющих поверхности проявляется только в виде побочных эффектов. Таким образом радиолокационные измерения, проводимые на возможно большем количестве частот при максимально широком диапазоне углов падения, увеличивают возможность точного описания этой поверхности.

## 2.3 Область применимости модели электромагнитного рассеяния

Добавление диапазона 50 МГц к существующим диапазонам 435 МГц и 1250 МГц расширило бы область применимости моделей электромагнитного рассеяния. Радары диапазона 50 МГц должны быть более чувствительными к структуре подповерхностного слоя, потому что среднеквадратичная высота поверхностного слоя составляет меньшую долю длины волны, что позволяет измерять более слабый радиолокационный сигнал обратного рассеяния. Повышенная чувствительность в диапазоне 50 МГц к структуре подповерхностного слоя в сочетании с тем обстоятельством, что в этом диапазоне сигналы глубже проникают в почву, увеличивает объем подповерхностного слоя, в котором возникает рассеяние. Это приводит к гораздо более высокому отношению мощности сигнала, принятого от подповерхностного слоя, к мощности сигнала, принятого от поверхности, чем на более коротких волнах. Кроме того, размер рассеивателей, содержащихся в аллювиальном покрове, будет меньше относительно 50 МГц, чем относительно 435 МГц или 1250 МГц.

## 2.4 Ранее проведенная работа и регламентарный статус полосы 40–44 МГц

Весьма значительный объем работы в виде разработки радиолокационных систем наземного и воздушного базирования и сбора данных уже выполнен в диапазоне 3–50 МГц. Наряду с разработкой аппаратного обеспечения были осуществлены расчеты, направленные на изучение зависимости глубины проникновения сквозь поверхность от содержания влаги в почве в диапазоне 3–50 МГц и проведен анализ результатов измерения отражений от поверхности океана океанографическими радарами.

Радарами, находящимися на воздушном судне, были выполнены измерения в диапазоне около 50 МГц в пустынных районах Аравийского полуострова и в Антарктиде. На рисунке 2 изображена радарограмма, показывающая изменение глубины залегания зеркала грунтовых вод в пределах от 49 до 52 метров, при этом данные были получены в 2011 году в Кувейте от радара ОВЧ-диапазона, находящегося на воздушном судне.

рисунок 2

Радарограмма, полученная в 2011 году в Кувейте от радара ОВЧ-диапазона,  
находящегося на воздушном судне



Возможность использования диапазона частот 3–50 МГц для расположенных вдоль побережья океанографических радаров (радиолокационной службы (РЛС)) была рассмотрена в рамках пункта 1.15 повестки дня ВКР-12, и исследования совместного использования частот были отражены в Отчете МСЭ‑R M.2234. ВКР-12 приняла решение осуществить распределение РЛС посредством ряда вторичных и первичных распределений на региональной основе и по странам, используя примечания в поддиапазонах частот от 4 до 44 МГц (полоса частот 43,35–44 МГц стала самой высокой полосой, распределенной РЛС с использованием примечаний для стран (две страны)), и примечания для защиты существующих служб – фиксированной и подвижной. Применения РЛС ограничены океанографическими радарами, работающими в соответствии с Резолюцией **612 (Пересм. ВКР-12)**. В этой Резолюции содержатся дополнительные ограничения для океанографических радаров, такие как максимальная э.и.и.м. в 25 дБВт и опознавание станции (позывной) на присвоенной частоте. В Регламенте радиосвязи отсутствует распределение ССИЗ (активной) в диапазоне 3–50 МГц. Если для бортовой космической системы будут выбраны частоты в более высоких или более низких полосах, то потребуется повторно подготовить справочный документ, посвященный аппаратному обеспечению и расчетам для работы радаров, находящихся на воздушном судне, в пустынных районах.

# 3 Технические характеристики бортового космического зондирующего радара диапазона 40–50 МГц

Бортовой космический зондирующий радар (радиолокационный зонд) будет работать на центральной частоте 45 МГц в полосе частот шириной 10 МГц, а полученные от него данные будут использоваться для изучения близких к поверхности слоев земной коры и составления радиолокационных карт поверхностных рассеивающих слоев, по которым можно будет определять места залегания воды, льда и различных отложений. Характеристики бортового космического зондирующего радара, работающего в диапазоне частот 45 МГц, приведены в таблице 1.

## 3.1 Задачи полета

Бортовой космический активный датчик, работающий в диапазоне частот 40–50 МГц, будет вырабатывать данные о подповерхностном слое земной коры с вертикальным разрешением 5–7 м: отношение сигнал/шум на поверхности будет равно приблизительно 66 дБ. Научные задачи полета заключаются в том, чтобы:

1) получить представление об общей толщине, внутренней структуре и термической устойчивости ледниковых щитов Земли (например, в Гренландии и Антарктиде) как о наблюдаемых параметрах изменения климата Земли, а также

2) получить представление о появлении, распределении и динамических свойствах реликтовых водоносных горизонтов Земли в пустынных природных средах (например, в Северной Африке и на Аравийском полуострове) как о важнейших составляющих понимания недавних палеоклиматических изменений.

Следует отметить, что с учетом высоких инвестиционных затрат, связанных с таким зондированием в полосе частот 40–50 МГц, число одновременно проводимых исследований такого рода будет скорее всего оставаться крайне малым.

## 3.2 Параметры орбиты

Ожидается, что бортовые космические активные датчики этого типа будут размещены на спутнике, находящемся на низкой околоземной орбите; наклон орбиты оптимизирован для солнечно-синхронной орбиты с эксцентриситетом менее 0,001. Параметры орбиты предлагаемой системы приведены в таблице 1.

## 3.3 Проектные параметры

Предлагаемая система для зондирующего радара на околоземной орбите представляет собой усовершенствованную для земных условий копию радиолокационного зонда неглубокого проникновения (SHARAD) – зондирующего радара, работавшего на околомарсианской орбите в полосе частот 15–25 МГц. Бортовой космический зондирующий радар передает ЧМ‑импульсы с центральной частотой 45 МГц и шириной полосы 10 МГц при частоте повторения импульсов 1200 Гц. Длительность каждого импульса составляет 85 мкс. Пиковая мощность РЧ‑сигнала равна 100 Вт; передаваемый сигнал имеет круговую поляризацию. Эти проектные параметры приведены в таблице 1.

ТАБЛИЦА 1

Характеристики бортового космического зондирующего радара в диапазоне частот 40−50 МГц

| Характеристики зонда | |
| --- | --- |
| Параметр | Значение |
| Тип | Радиолокационный зонд |
| **Характеристики орбиты** | |
| Тип орбиты | Круговая, ССО[[1]](#footnote-1) |
| Высота (км) | 400 |
| Наклонение (градусы) | 97° |
| Местное солнечное время восходящего узла | 004:00 |
| Эксцентриситет (градусы) | 0° |
| Число оборотов в сутки | 15,8 |
| Период повторения трассы (сутки) | 548 |
| **Характеристики антенны** | |
| Тип антенны | 9-элементная крестообразная директорная |
| Количество лучей | 1 |
| Пиковое усиление (на передачу и прием – дБи) | 10 |
| Поляризация | Круговая |
| Ширина луча по уровню –3 дБ (градусы) | 40° |
| Угол обзора луча антенны (градусы) | Надир |
| Азимут луча антенны (градусы) | Надир |
| Ширина луча антенны по углу места (градусы) | 40° |
| Ширина луча антенны по азимуту (градусы) | 40° |
| Диаграмма направленности антенны датчика | См. рисунок 3 |
| **Характеристики передатчика** | |
| Центральная частота РЧ-сигнала (МГц) | 45 |
| Ширина полосы радиочастот по уровню 3 дБ (МГц) | 8 |
| Ширина полосы радиочастот по уровню 20 дБ (МГц) | 10 |
| Пиковая мощность передаваемого сигнала (дБВт) | 20 |
| Длительность импульса (мкс) | 85 |
| Частота повторения импульсов (PRF) (Гц) | 1 200 |
| Импульсная модуляция | Линейная частотная модуляция (ЛЧМ) |
| **Характеристики приемника** | |
| Центральная частота РЧ-сигнала (МГц) | 45 |
| Коэффициент усиления (дБ) | 40–50 |
| Отношение сигнал/шум (дБ) | 30 |
| Ширина полосы пропускания МШУ (МГц) | > 100 |
| Ширина полосы пропускания оконечного фильтра ПЧ (МГц) | 12 |
| Коэффициент шума (дБ) | 5 |
| Наименьший обнаруживаемый уровень сигнала (дБм) | –132 |
| Динамический диапазон (дБ) | < 20 |

Диаграмма направленности антенны предлагаемой системы имеет пиковое усиление 10 дБи и ширину луча 40° по дальности и азимуту, как показано на рисунке 3.

Рисунок 3

Диаграмма направленности 9-элементной директорной антенны



## 3.4 Эксплуатационные географические ограничения

Зондирующие радары, работающие в диапазоне частот 40–50 МГц, предназначены для эксплуатации в незаселенных или малонаселенных районах ледниковых щитов (например, в Гренландии и Антарктиде) и пустынь (например, в Северной Африке и на Аравийском полуострове) и в течение ограниченного периода времени. Например, ожидается, что длительность предлагаемого полета не превысит 10 минут на каждый оборот по орбите, составляющий 92,7 минуты.

Зоны покрытия в предлагаемых районах исследования, то есть географические области, по которым будет распространяться переданный сигнал, показаны на рисунке 4.

РИСУНОК 4

Зона покрытия бортового космического радиолокационного зонда

-

Зондирующие радары рассчитаны на работу только в течение временно́го окна продолжительностью нескольких часов с центром около 4 часов утра по местному времени. Это время выбрано потому, что оно характеризуется минимальным уровнем ионосферных возмущений, воздействующих на радиолокационный сигнал, и наименьшей вероятной интенсивностью использования тех же частот другими службами.

## 3.5 Спектр излучения

На рисунке 5 показана типичная форма спектра излучения ЛЧМ, ожидаемая для радиолокационного зонда, работающего в диапазоне частот 40−50 МГц. На практике для ослабления внеполосной мощности часто применяется полосовая фильтрация.

РИСУНОК 5

Типичный спектр излучения ЛЧМ

# A graph with a red line

# 4 Уровни п.п.м. на поверхности Земли

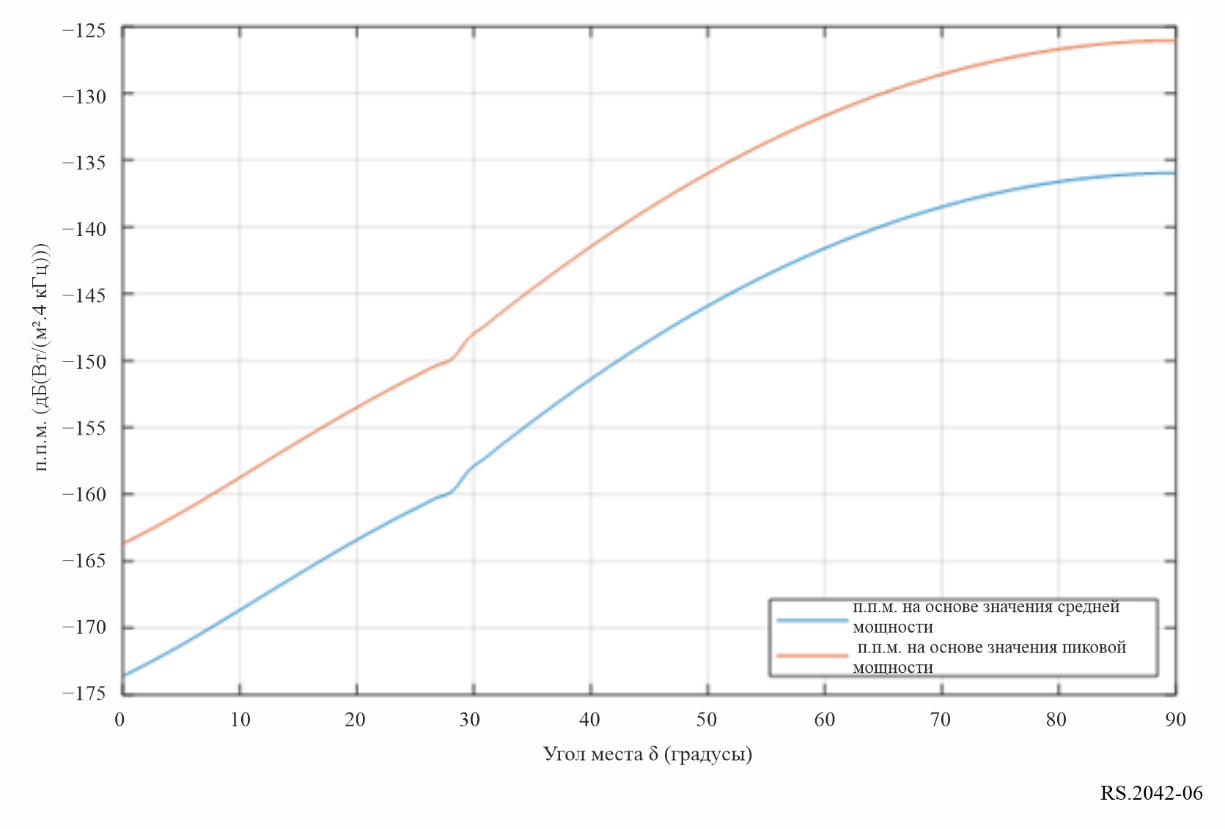
Средняя плотность потока мощности (п.п.м.) на поверхности Земли рассчитывается с использованием формулы, приведенной в п. **21.16.8** РР в редакции 2020 года.

Аналогичным образом пиковое значение п.п.м. можно рассчитать, исключив коэффициент заполнения из формулы, используемой для расчета среднего значения п.п.м.

Для параметров радиолокационного зонда, указанных в таблице 1, средние значения п.п.м. на поверхности Земли приведены на рисунке 6. Из рисунка 6 следует, что максимальное среднее значение п.п.м. равно −135,96 дБ(Вт/м2 4 кГц), а результирующее максимальное пиковое значение п.п.м. равно −126,05 дБ(Вт/м2 4 кГц).

РИСУНОК 6

Плотность потока мощности (п.п.м.) в зависимости от угла места δ для бортового космического радиолокационного зонда диапазона ОВЧ, описанного в таблице 1 (эталонная ширина полосы 4 кГц)



# 5 Выводы

Дистанционное зондирование в диапазоне около 40–50 МГц представляет интерес для проведения дистанционных измерений подземных слоев и обеспечения радиолокационных карт подповерхностных рассеивающих слоев для определения местоположения водных/ледовых отложений с помощью бортовых космических активных датчиков. В настоящем Приложении обоснован выбор предпочтительной полосы частот, а также приводятся типовые технические и эксплуатационные характеристики возможного прибора для применения в исследованиях совместного использования частот и совместимости.

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

1. Солнечно-синхронная орбита (ССО). [↑](#footnote-ref-1)