

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 онлайн-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 радаром 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:

$$\delta_p = \frac{\lambda_0 \sqrt{e'}}{2\pi e''}, \quad (1)$$

где:

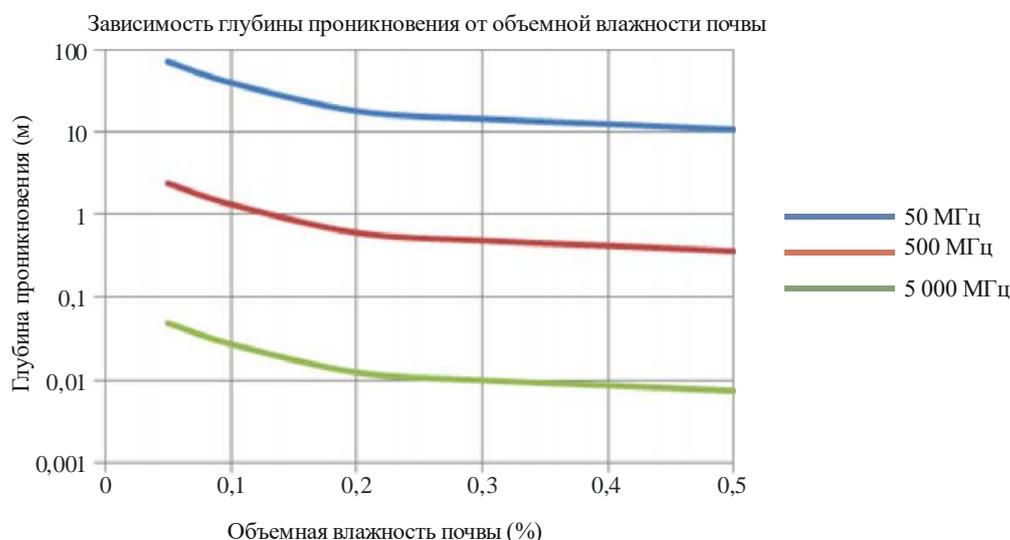
λ_0 : длина волны;

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



RS.2042-01

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.

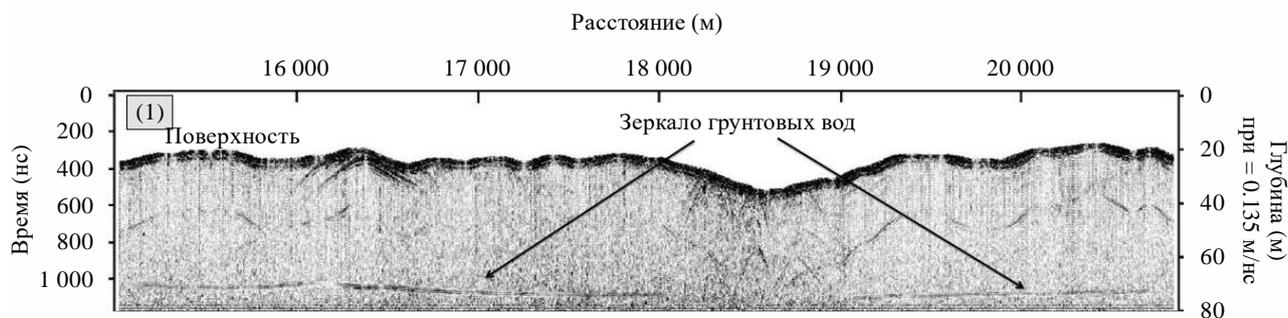
2.4 Ранее проведенная работа и регламентарный статус полосы 40–44 МГц

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 радарми.

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



RS.2042-02

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 М.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 радарми, 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 потребуются 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

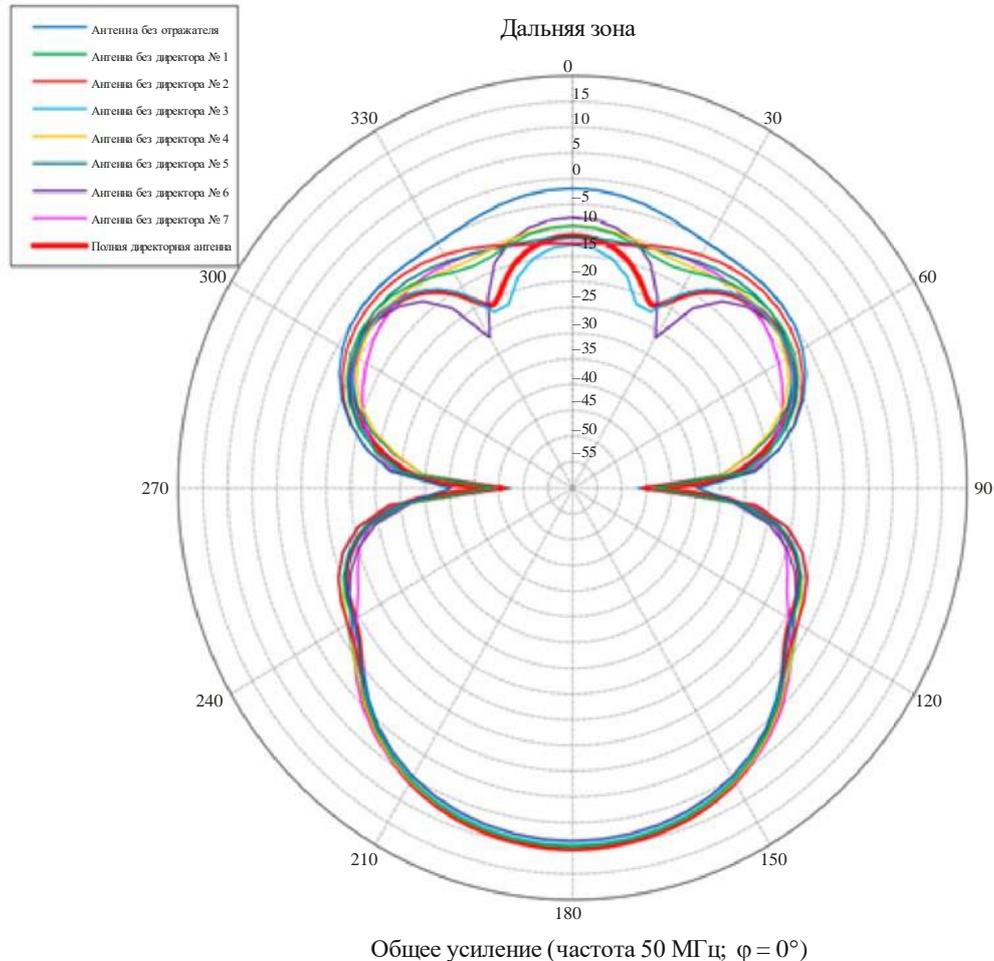
Характеристики зонда	
Параметр	Значение
Тип	Радиолокационный зонд
Характеристики орбиты	
Тип орбиты	Круговая, ССО ¹
Высота (км)	400
Наклонение (градусы)	97°
Местное солнечное время восходящего узла	004:00
Эксцентриситет (градусы)	0°
Число оборотов в сутки	15,8
Период повторения трассы (сутки)	548
Характеристики 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

¹ Солнечно-синхронная орбита (ССО).

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



RS.2042-03

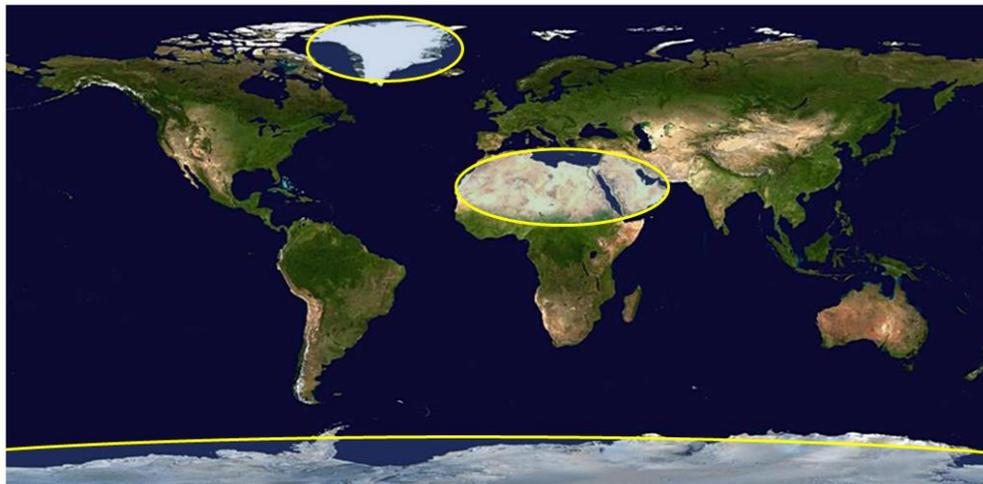
3.4 Эксплуатационные географические ограничения

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



RS.2042-04

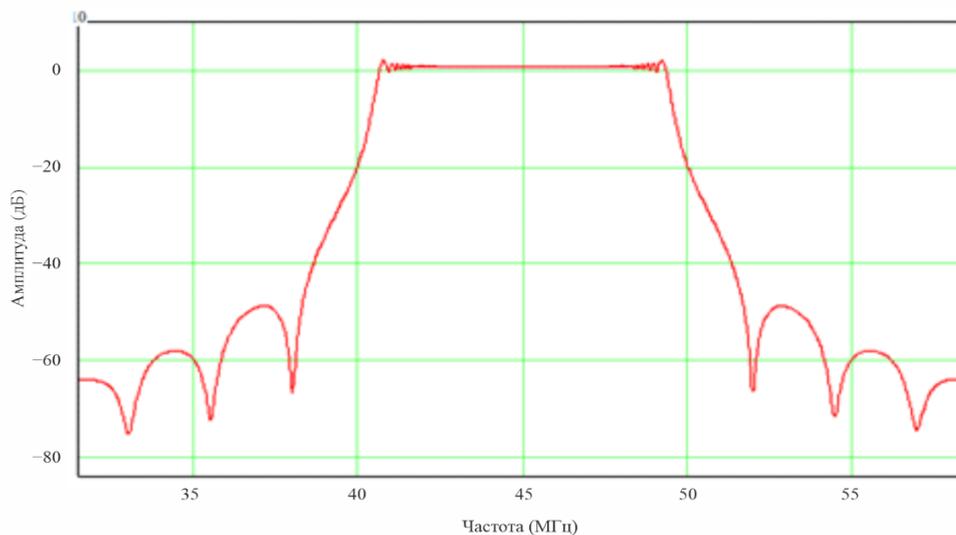
Зондирующие радары рассчитаны на работу только в течение временного окна продолжительностью нескольких часов с центром около 4 часов утра по местному времени. Это время выбрано потому, что оно характеризуется минимальным уровнем ионосферных возмущений, воздействующих на радиолокационный сигнал, и наименьшей 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



RS.2042-05

4 Уровни п.п.м. на поверхности Земли

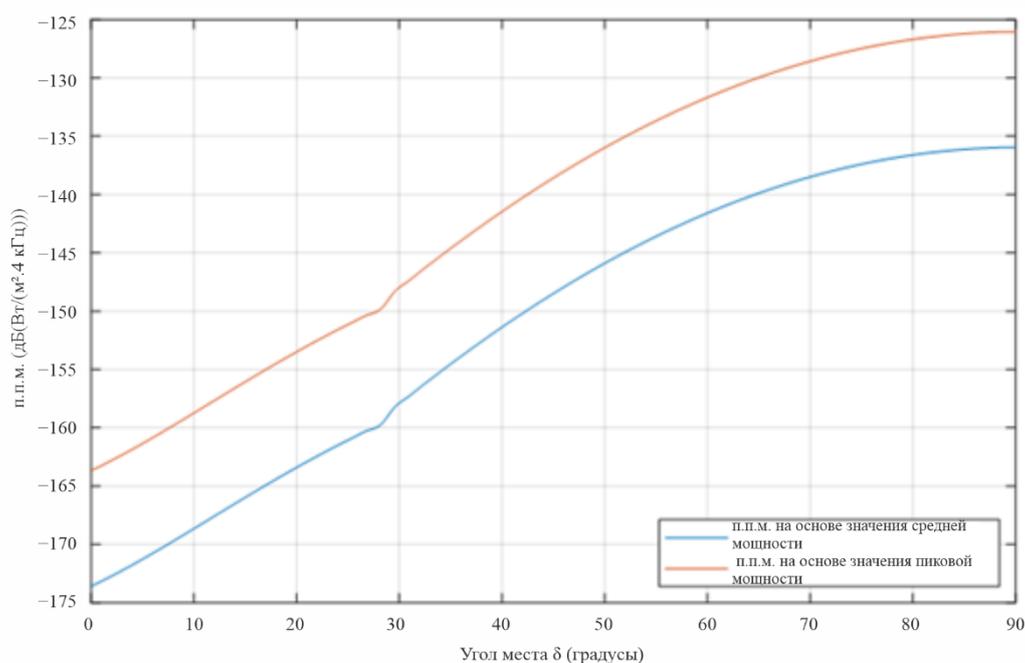
Средняя плотность потока мощности (п.п.м.) на поверхности Земли рассчитывается с использованием формулы, приведенной в п. 21.16.8 РР в редакции 2020 года.

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)



RS.2042-06

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.