

МСЭ-R

Сектор радиосвязи МСЭ

Рекомендация МСЭ-R RS.2042-1
(12/2018)

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

Серия RS
Системы дистанционного зондирования



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-T/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: <http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/en>, где также содержатся Руководящие принципы по выполнению общей патентной политики МСЭ-T/МСЭ-R/ИСО/МЭК и база данных патентной информации МСЭ-R.

Серии Рекомендаций МСЭ-R

(Представлены также в онлайн-форме по адресу: <http://www.itu.int/publ/R-REC/en>.)

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, 2019 г.

© ITU 2019

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.2042-1

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

(2014-2018)

Сфера применения

В настоящей Рекомендации приводятся технические и эксплуатационные характеристики бортовых космических радиолокационных зондов, которые будут работать в диапазоне частот около 45 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 и Отчеты МСЭ-R

Проект нового Отчета МСЭ-R RS.[VHF_SOUNDERS] "Предварительные результаты исследований совместного использования частот радиолокационными зондами, работающими на частоте 45 МГц, и действующими фиксированной службой, подвижной службой, радиовещательной службой и службой космических исследований, работающими в диапазоне частот 40–50 МГц".

Отчет МСЭ-R M.2234 "Возможность совместного использования поддиапазонов океанографическими радарными, работающими в радиолокационной службе, а также фиксированной и подвижной службами в диапазоне частот 3–50 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, таких как 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, таких как Северная Африка и Аравийский полуостров, как о важнейших составляющих понимания недавних палеоклиматических изменений;
- c) что необходимо измерить коэффициент отражения радиоволн от подповерхностных рассеивающих слоев на глубине от 10 м до 100 м;
- d) что глубина проникновения длин волн в подповерхностные рассеивающие слои на СВЧ-волнах увеличивается приблизительно в обратной зависимости от частоты;
- e) что для проведения в мировом масштабе многократных измерений подповерхностных водных отложений в пустынных природных средах, таких как Северная Африка и Аравийский полуостров, и многократных измерений ледниковых щитов, таких как в Гренландии и Антарктиде, требуется использовать бортовые космические активные датчики;
- 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 основе любительской, радиовещательной, фиксированной и подвижной, воздушной радионавигационной и радиолокационной службам в некоторых частях мира;
- j) что бортовые космические радиолокационные зонды будут работать с другими первичными и вторичными службами в соответствии с пунктом 4.4 РР на основе непричинения помех, а также они не должны создавать вредных помех и не должны требовать защиты;
- k) что полосы шириной 10 МГц достаточно для использования бортовыми космическими радиолокационными зондами;
- l) что были определены эксплуатационные ограничения, позволяющие работать в соответствии с пунктом 4.4 РР на основе непричинения помех, например работать только в незаселенных или малонаселенных районах ледниковых щитов Гренландии и Антарктиды и пустынь Северной Африки и Аравийского полуострова, а также эксплуатировать радары только в ночное время, с 3 до 6 часов утра по местному времени, как указано в Приложении 1,

рекомендует,

чтобы приведенные в таблице 1 Приложения характеристики применялись в бортовом космическом радиолокационном зонде и использовались в исследованиях совместимости.

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 залегающих 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 бортового космического активного датчика, работающего в диапазоне частот 40–50 МГц, и рассматривается совместное использование частот с другими службами, имеющими распределения в этом диапазоне частот.

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:

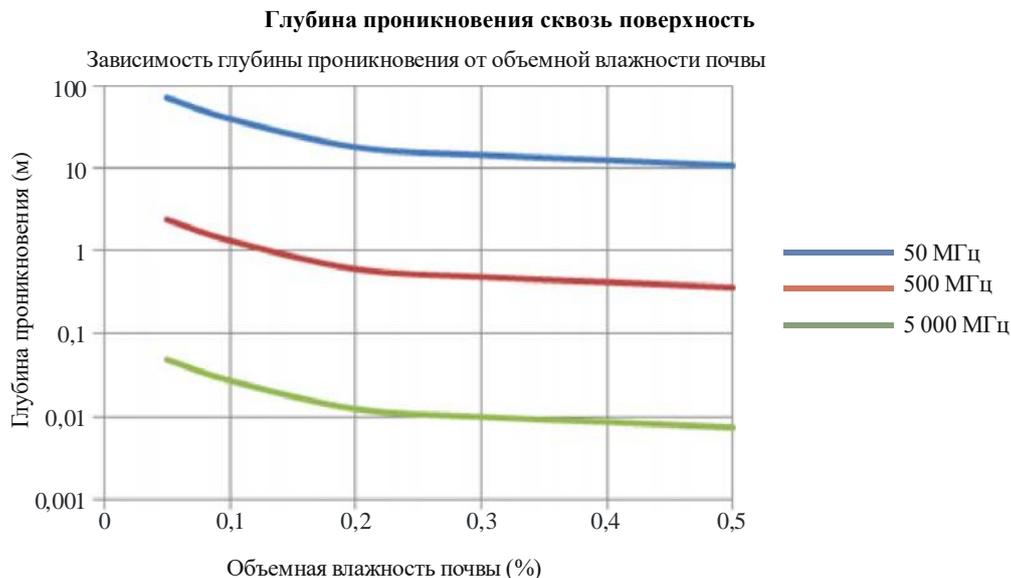
$$\delta_p = \frac{\lambda_0 \sqrt{e'}}{2\pi e''}, \quad (1),$$

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



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.

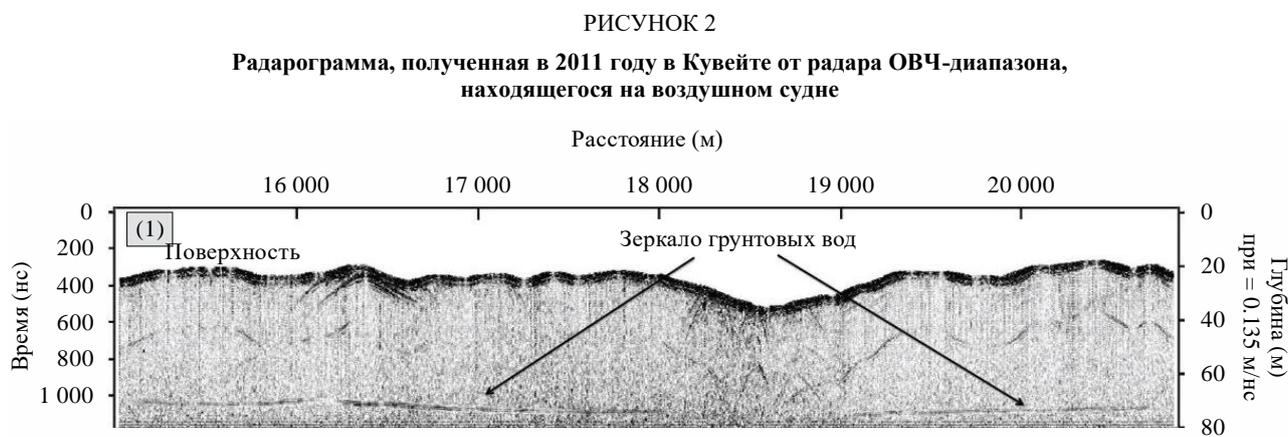
2.3 Область применимости модели электромагнитного рассеяния

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 радарными.

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.



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 радарными, 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 66 дБ. Орбитальной картографической программой планируется проведение контрольно-испытательных работ на орбите в течение одного месяца и сбор научных данных в течение 18 месяцев. Научные задачи полета заключаются в том, чтобы 1) получить представление об общей толщине, внутренней структуре и термической устойчивости ледниковых щитов Земли, таких как 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, таких как Северная Африка и Аравийский полуостров, как о важнейших составляющих понимания недавних палеоклиматических изменений. Восемнадцать месяцев – достаточный срок для сбора данных из районов, представляющих научный интерес, с шагом траектории надира 5 км на экваторе при использовании точно повторяющейся орбиты высотой 400 км с периодом повторения трассы 548 дней (18 месяцев). Ввиду временной нестабильности, присущей как ледяным полям, так и водоносным горизонтам в пустынных природных средах, последующие научные исследования длительностью по 18 месяцев предполагается проводить раз в десять лет.

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 и вряд ли превысит два.

3.2 Параметры орбиты

Бортовой космический активный датчик размещается на спутнике, находящемся на низкой околоземной орбите на высоте 400 км; наклон орбиты оптимизирован для солнечно-синхронной орбиты с эксцентриситетом менее 0,001. Параметры орбиты приведены в таблице 1.

3.3 Проектные параметры

Гипотетический радиолокационный зонд на околоземной орбите представляет собой усовершенствованную для земных условий копию радиолокационного зонда неглубокого проникновения (SHARAD) – зондирующего радара, работавшего на околосарисанской 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

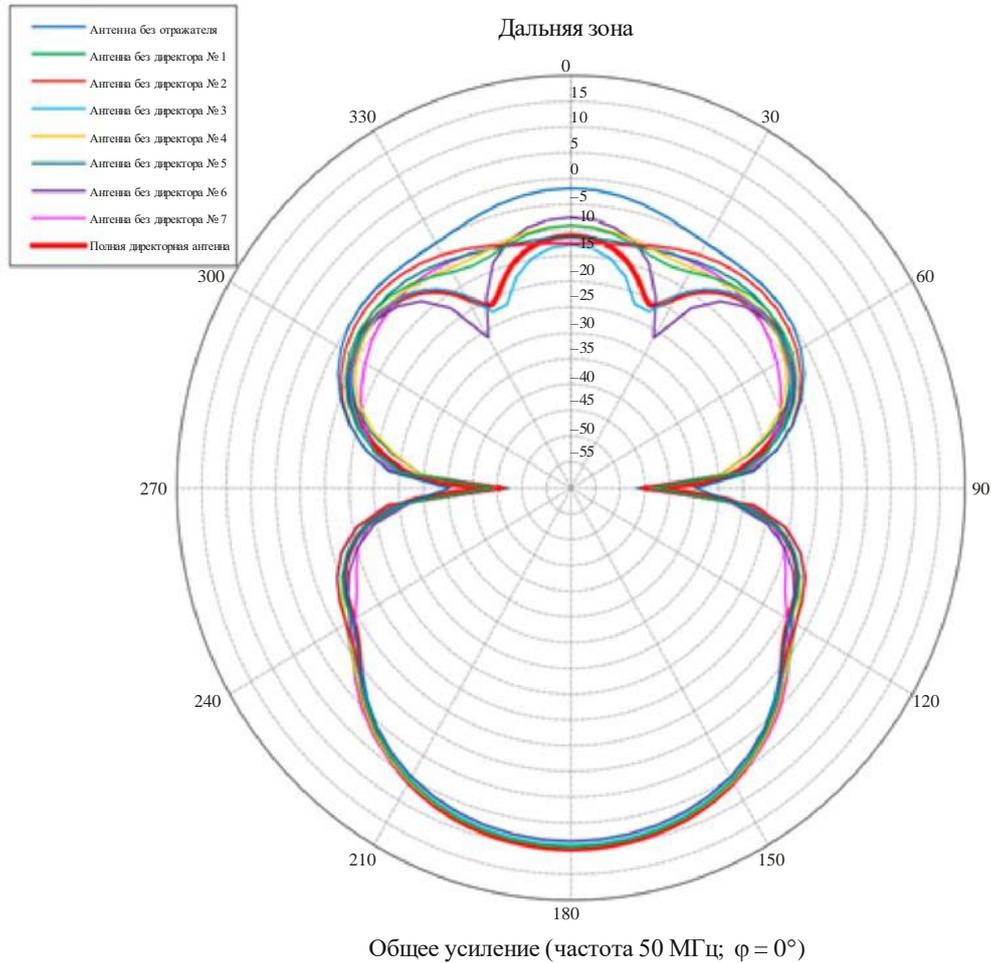
Характеристики бортового космического зондирующего радара диапазона 45 МГц

Характеристики зонда	
Параметр	Значение
Тип	Радиолокационный зонд
Характеристики орбиты	
Тип орбиты	Солнечно-синхронная
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 (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

Антенна бортового космического зондирующего радара является 9-элементной крестообразной директорной антенной с коэффициентом усиления, равным 10 дБи, и шириной луча в 40° по дальности и азимуту, как показано на рисунке 3.

РИСУНОК 3

Диаграмма направленности 9-элементной директорной антенны



RS.2042-03

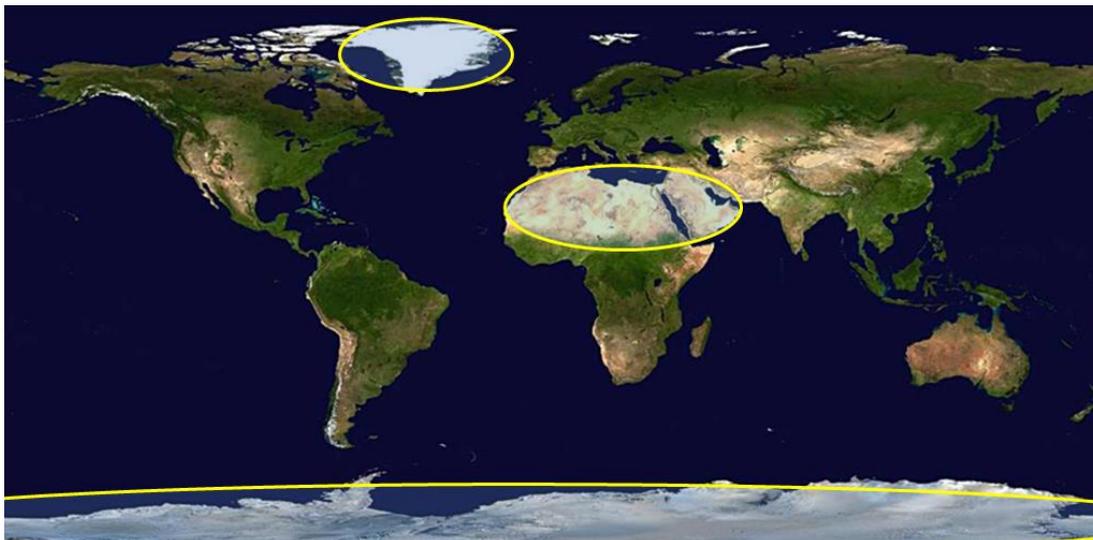
3.4 Эксплуатационные географические ограничения

Радиолокационный зонд должен работать исключительно в незаселенных или малонаселенных районах ледниковых щитов Гренландии и Антарктиды и пустынь Северной Африки и Аравийского полуострова, и длительность его работы не должна превышать 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

Радиолокационный зонд должен работать только в ночное время между 3 и 6 часами 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.

4 Уровни п.п.м. и спектральной п.п.м. у поверхности Земли

Для приведенных в таблице 1 параметров зондирующего радара рассчитан уровень плотности потока мощности (п.п.м.) у поверхности Земли, который должен составлять $-93,3$ дБ(Вт/м²) на частоте 45 МГц, что соответствует спектральной п.п.м. с уровнем $-163,3$ дБ(Вт/(м² · Гц)) на частоте 45 МГц, исходя из полосы шириной 10 МГц.

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.

Сформулированы технические и эксплуатационные характеристики бортового космического радиолокационного зонда, который будет работать в диапазоне частот 40–50 МГц.