

РЕКОМЕНДАЦИЯ МСЭ-R RS.1166-4

Критерии качества и помех* для активных бортовых датчиков

(1995-1998-1999-2006-2009)

Сфера применения

В данной Рекомендации содержатся критерии качества и помех для активных бортовых датчиков в полосах частот, распределенных для спутниковой службы исследования Земли – ССИЗ (активной). В Приложении представлены технические основы разработки этих критериев качества и помех для различных типов активных бортовых датчиков. К типам датчиков относятся высотомеры, рефлектометры, радары контроля осадков, радары с синтезированной апертурой и радары профилирования облачности.

Ассамблея радиосвязи МСЭ,

учитывая,

- a) что для бортового активного микроволнового дистанционного зондирования требуются определенные диапазоны частот, в зависимости от наблюдаемого физического явления;
- b) что некоторые полосы частот были распределены для бортового активного микроволнового дистанционного зондирования;
- c) что эти полосы частот также распределены другим радиослужбам;
- d) что исследования установили требования к чувствительности измерения;
- e) что требования качества для активных датчиков могут быть сформулированы на основе точности измерения физических параметров и готовности, измеренных на спутнике, при условии, что ухудшение, создаваемое другими элементами, будет небольшим;
- f) что критерии качества для активных бортовых микроволновых датчиков являются предпосылкой для определения соответствующих критериев помех;
- g) что критерии помех необходимы для гарантии того, что системы могут быть разработаны для достижения адекватного качества в присутствии помехи, для оценки совместимости с системами других служб и, при необходимости, для помощи в разработке критериев для совместного использования частот разными службами;
- h) что в Приложении 1 приведены технические основы для критериев качества и помех, основанные на типичных активных датчиках,

* Критерии помех автоматически не предполагают критерии совместного использования.

рекомендует,

1 чтобы приведенные в таблице 1 критерии качества применялись к инструментам, используемым при активном зондировании суши, океанов и атмосферы Земли:

ТАБЛИЦА 1

Полоса частот	Критерии качества работы для инструментов дистанционного зондирования				
	Рефлектометр	Высотомер	Формирователь изображения РСА	Радар контроля осадков	Радары профилирования облачности
432–438 МГц			Минимальный коэффициент отражения –21 дБ		
1 215–1 300 МГц			Минимальный коэффициент отражения –32 дБ		
3 100–3 300 МГц		Точность морского уровня ≤ 3 см	Минимальный коэффициент отражения –26 дБ		
5 250–5 570 МГц	Скорость ветра ≥ 3 м/с	Точность морского уровня ≤ 3 см	Минимальный коэффициент отражения –24 дБ		
8 550–8 650 МГц	Скорость ветра ≥ 3 м/с	Точность морского уровня ≤ 3 см	Минимальный коэффициент отражения –21 дБ		
9 300–9 900 МГц ⁽¹⁾	Скорость ветра ≥ 3 м/с	Точность морского уровня ≤ 3 см	Минимальный коэффициент отражения –18 дБ		
13,25–13,75 ГГц	Скорость ветра ≥ 3 м/с	Точность морского уровня ≤ 3 см		Минимальная интенсивность дождя 0,7–0,75 мм/ч	
17,2–17,3 ГГц	Скорость ветра ≥ 3 м/с			Минимальная интенсивность дождя 0,7–0,75 мм/ч	
24,05–24,25 ГГц				Минимальная интенсивность дождя 0,7–0,75 мм/ч	
35,5–36 ГГц	Скорость ветра ≥ 3 м/с	Точность морского уровня ≤ 3 см		Минимальная интенсивность дождя 0,1–0,2 мм/ч	–17 dBZ ± 10%
78–79 ГГц					–27 dBZ ± 10%
94–94,1 ГГц					–30 dBZ ± 10%
133,5–134 ГГц					–34 dBZ ± 10%
237,9–238 ГГц					–44 dBZ ± 10%

dBZ: "единица" коэффициента отражения радара, используемая в метеорологии, которая представляет собой логарифмический коэффициент мощности (в децибелах, или дБ) относительно фактора коэффициента отражения радара, Z, относящегося к значению $1 \text{ мм}^6/\text{м}^3$.

SAR: радар с синтезированной апертурой.

(1) См. соответствующие решения ВКР-07.

2 чтобы критерии помех и доступности данных, приведенные в таблице 2, применялись к инструментам, используемым в активном режиме зондирования суши, океанов и атмосферы Земли;

ТАБЛИЦА 2

Тип датчика	Критерии помех		Критерии доступности данных (%)	
	Ухудшение качества	I/N (дБ)	Систематические	Случайные
Радар с синтезированной апертурой	Ухудшение на 10% нормированного среднеквадратичного отклонения мощности, получаемой от пикселя	-6	99	95
Высотомер	Ухудшение на 4% шума измерения высоты	-3	99	95
Рефлектометр	Ухудшение на 8% точности измерения нормированного радарного коэффициента обратного рассеяния при вычислении скорости ветра	-5	99	95
Радар контроля осадков	Увеличение на 7% минимальной интенсивности дождя	-10	Н/Д	99,8
Радар профилирования облачности	Ухудшение на 10% минимального коэффициента отражения облачности	-10	99	95

В полосах с вторичным распределением критерии помех предоставляются только для указания ухудшения качества по отношению к первичным службам.

Приложение 1

Критерии качества и помех для активных бортовых датчиков

1 Введение

Критерии качества для активных бортовых датчиков необходимы для разработки критериев помех. Критерии помех, в свою очередь, могут использоваться при оценке совместимости систем радионавигации и радиолокации и активных датчиков в общих полосах частот.

В данном Приложении представлены технические основы для разработки критериев качества и помех для различных типов активных бортовых датчиков. К типам датчиков относятся высотомеры, рефлектометры, радары контроля осадков, радары с синтезированной апертурой и радары профилирования облачности.

Хотя критерии основаны на действующих и запланированных проектах систем космических научных служб и соответствующих эксплуатационных требованиях, ожидается, что будущие системы космических научных служб будут разработаны таким образом, чтобы обеспечить, по крайней мере, те же самые уровни сигналов помехи и увязанные с ними пространственные и временные условия.

2 Высотомеры

В данном разделе представлена информация о критериях качества и помех для бортовых высотомеров в полосах частот 3,1–3,3 ГГц, 5,25–5,57 ГГц, 8,55–8,65 ГГц, 9,5–9,8 ГГц, 13,25–13,75 ГГц и 35,5–35,6 ГГц.

2.1 Критерии качества

После обработки данных, бортовые космические высотомеры определяют уровень моря с точностью более 3 см. Уровень шума при измерениях высоты высотомерами равен около 2–2,4 см для спокойного состояния моря. Увеличение уровня шума при измерении высоты на 0,1 см из-за помех не повлияет существенно на данные и является приемлемым. Другими словами, ухудшение шума измерения высоты на 4% совместимо с целями измерения.

Перед высотомером ставится минимальная задача получения 90% всех возможных данных по океанам. Цель проекта превышает минимальное требование и заключается в получении 95% всех возможных данных. Наблюдения должны проводиться так близко к границе море-земля, насколько это возможно (до 15 км от границы море-земля может возникать искажение формы сигнала высотомера, которое снижает точность измерения высот). Сумма потерянных данных должна учесть все источники потери, включая вызванные системами космического корабля, аппаратурой высотомера, маневрами и т. д.

Требование готовности для данных альтиметрии составляет 95% с учетом того, что соответствующие отдельные прерывания связи являются краткими и случайно распределенными по всему интервалу времени и области наблюдения (т. е. большинство прерываний связи продолжаются не более 2 секунд).

Влияние помехи, которая всегда присутствует в данном географическом местоположении, намного серьезнее, чем влияние случайной помехи, потому что в таких географических областях невозможно производить измерения. В этом случае, требование для высотомеров состоит в получении достоверных данных для 99% всех географических областей, представляющих интерес.

2.2 Критерии помех

Типичные высотомеры имеют ресурсы связи, которые приводят к отношениям сигнал/шум (S/N), равным 13 дБ (кроме высотомеров в полосе частот 35,5–36 ГГц) в ширине полосы приемника с разрешением по дальности 39,9 дБ/Гц. Шум высоты высотомера изменяется как $1 + 2(S/N)$. Для сигнала отклика, имеющего S/N 13 дБ до помехи, сложение помехи вызывает следующее увеличение в шуме измерения высоты:

Уровень помехи	S/N (дБ)		Ухудшение (%)	
	"Не белая" помеха	"Белая" помеха	"Не белая" помеха	"Белая" помеха
Отсутствует	13	13	Основной уровень	Основной уровень
На 10 дБ ниже уровня шума	12,6	12,99	1	0,05
На 3 дБ ниже уровня шума	11,25	12,5	4,5	1
Равен уровню шума	10	11,5	9	3,8
На 10 дБ выше уровня шума	2,6	3	91	82

Для высотомеров в полосе частот 35,5–36 ГГц атмосферные эффекты и технические ограничения приводят к менее благоприятным ресурсам связи (S/N около 10 дБ), и в связи с повышением чувствительности к уровню помех, необходимо принимать во внимание следующие значения:

Уровень помехи	S/N (дБ)		Ухудшение (%)	
	"Не белая" помеха	"Белая" помеха	"Не белая" помеха	"Белая" помеха
Отсутствует	10	10	Основной уровень	Основной уровень
На 10 дБ ниже уровня шума	9,6	9,98	1,7	0,08
На 6 дБ ниже уровня шума	9,0	9,9	4,2	0,5
На 3 дБ ниже уровня шума	8,2	9,5	8,4	1,2
На 1,5 дБ ниже уровня шума	7,7	9,1	11,8	3,8
Равен уровню шума	7,0	8,5	17	6,9
На 10 дБ выше уровня шума	-0,4	0	167	150

Ухудшение шума измерения высоты более чем на 4% не позволит выполнить требования миссии. Для учета негауссовской помехи порог для помехи устанавливается на 3 дБ ниже уровня шума. Как видно, ухудшение рабочих характеристик резко возрастает для уровней помех выше уровня шума.

Поэтому критерием вредных помех для высотомеров является суммарный уровень мощности мешающего сигнала, равный -117 дБ(Вт/320 МГц) для 13–14 ГГц и уровень 119 дБ(Вт/450 МГц) для 35,5–36,0 ГГц, который вызвал бы недопустимое увеличение в шуме измерения высоты.

В совместно используемых полосах частот готовность данных высотомера должна превышать 95% всех пунктов в зоне обслуживания датчика в том случае, когда потеря является случайной, и превышать 99% всех пунктов, где потеря происходит систематически в одних и тех же пунктах.

3 Рефлектометры

В данном разделе представлена информация о критериях качества и помех для бортовых рефлектометров в полосах частот 5,25–5,57 ГГц, 8,55–8,65 ГГц, 9,5–9,8 ГГц, 13,25–13,75 ГГц, 17,2–17,3 ГГц и 35,5–36,0 ГГц. Приведены критерии качества и помех для активных бортовых рефлектометров, которые могут применяться при анализе совместимости активных бортовых рефлектометров с радионавигационными и радиолокационными системами в этих полосах частот.

Нежелательные радиочастотные излучения, достигающие приемника измерителя поверхностной неоднородности, могут исказить измерения σ_0 радарного рефлектометра, где σ_0 – нормированный радарный коэффициент обратного рассеяния. Величина ухудшения будет зависеть от статистики по внешней помехе.

3.1 Критерии качества

В системах рефлектометра, оценка мощности эхо-сигнала проводится первым измерением мощности "сигнал + шум" (т. е. эхо-сигнал плюс вносимый шум системы), а затем вычитанием мощности "только шум" (оценка только шума системы или "уровня шум"). В шум системы включаются тепловые излучения Земли, антенны, волноводы, а также коэффициент шума приемника. Чтобы оптимизировать качество системы измерения мощности "сигнал + шум" и "только шум", измерения проводятся при различных значениях ширины полосы и/или в разное время. Такая стратегия опирается на тот факт, что номинальный шум системы является по своей природе белым в течение последовательности измерений (постоянный шум с плоским спектральным распределением мощности).

Если присутствует внешняя помеха, то новый составной фоновый шум представляет собой сумму помехи и номинального шума системы. В зависимости от силы, модуляции, диаграммы усиления антенны и геометрии источника помех, составной шум не может быть белым в течение последовательности измерений. Измерение "только шум" не будет тогда соответствовать шуму измерения "сигнал + шум", что приведет к ошибкам в оценке σ_0 .

Предполагаемая ошибка σ_0 , которая следует из данной ошибки измерения "только шум", может быть количественно определена следующим уравнением:

$$\text{Ошибка } \sigma_0 \text{ (дБ)} = 10 \log [1 + (\alpha - 1) / SNR \sigma_0], \quad (1)$$

где:

$$SNR \sigma_0 \text{ (дБ)} = 10 \log (S/N) = \text{соотношение сигнал-шум процесса оценки } \sigma_0$$

с:

S : спектральная плотность мощности эхо-сигнала;

N : номинальная спектральная плотность мощности уровня шума (приблизительно -200 дБ(Вт/Гц) в приемнике рефлектометра для антенн "веерного луча" и "сфокусированного луча").

и

$$\alpha \text{ (дБ)} = 10 \log ([N + (I_{s+n} / B_{s+n})] / [N + (I_n / B_n)]) \quad (2)$$

с:

I_{s+n} : средняя мощность от источника помех в B_{s+n} в течение периода измерения "сигнал + шум";

B_{s+n} : ширина полосы измерения "сигнал + шум";

I_n : средняя мощность от источника помех в B_n в течение периода измерения "только шум";

B_n : ширина полосы измерения "только шум".

Влияние внешней помехи наиболее неблагоприятно при ветрах с низкой скоростью. Самая низкая скорость ветра, которая может быть измерена бортовыми космическими рефлектометрами, составляет 3 м/с. Результаты компьютерного моделирования, проводимые для неустановившейся помехи рефлектометра NSCAT, показали, что максимальное значение α (см. уравнение (2)), которое позволит выполнить требования качества для скорости ветра, равной 3 м/с, равно 0,7 дБ.

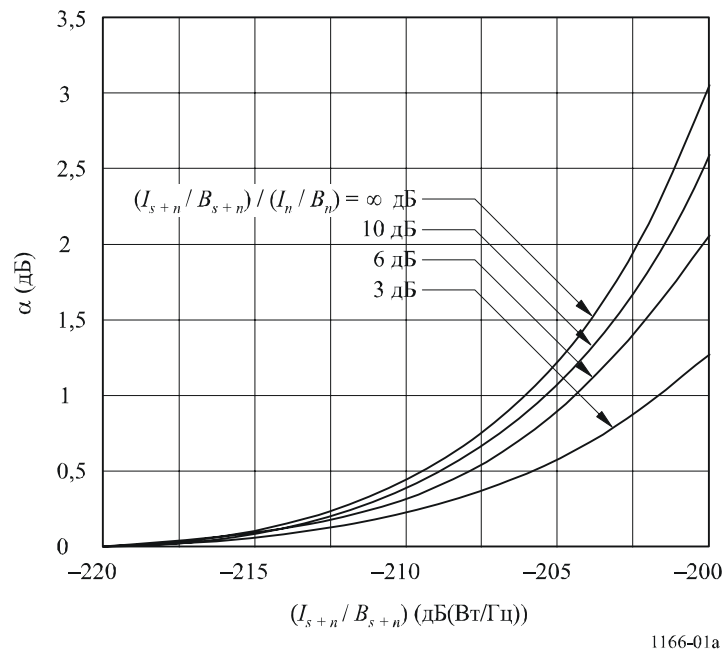
В будущем рефлектометры могут использовать антенны со сфокусированной диаграммой направленности, а не антенны с веерной диаграммой направленности, которые используются для NSCAT. Основные отличия, помимо диаграммы направленности антенны, между двумя типами рефлектометров, включают излучаемую э.и.и.м. и усиление приемной антенны. Результаты компьютерного моделирования, проводимые для нестационарной помехи, показали, что максимальное значение $\alpha = 6$ дБ (см. уравнение (2)) может допускаться для антенны со сфокусированной диаграммой направленности, и при этом будет выполняться требование качества для скорости ветра 3 м/с.

Допустимая потеря данных рефлектометра из-за помехи от радиочастотных станций, случайно распределенных среди океанов, равна 5% от общего объема данных, полученных для мирового океана. Допустимая потеря для систематической помехи составляет 1%. Систематическая помеха определена как потеря покрытия в тех же пунктах над океанами для большинства проходов над этими пунктами. Эти максимально допустимые потери были получены из научных требований NSCAT к измерению 90% глобальных векторов ветров по океанам, с учетом прочих случайно распределенных потерь данных, представленных главным образом в областях с интенсивными дождями.

3.2 Критерии помех

На рисунке 1а представлен график уравнения (2) для рефлектометра с уровнем шума приемника $N = -200$ дБ(Вт/Гц). α на нем представлена как функция спектральной плотности мощности мешающего сигнала (I_{s+n}/B_{s+n}) . Отметим, что в зависимости от изменения помехи во времени или по ширине полосы, будут получены различные результаты α . На рисунке 1а представлено семейство графиков для нескольких значений параметра $10 \log [(I_{s+n}/B_{s+n})/(I_n/B_n)]$.

РИСУНОК 1а



1166-01a

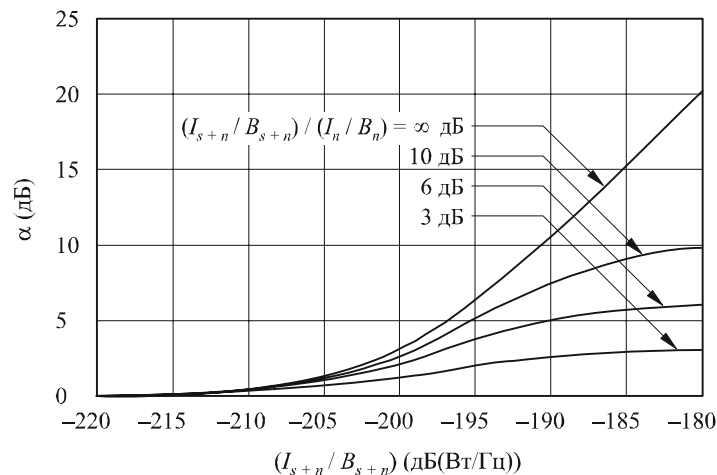
Разделение во времени периода измерения "сигнал + шум" от центра периода измерения "только шум" составляет приблизительно 0,23 секунды. В это время угол от рефлектометра космического аппарата до заданной точки на земле изменится приблизительно на $0,1^\circ$. Из-за узкой ширины луча антенны с веерной диаграммой направленности (ширина луча $0,42^\circ$ на уровне 3 дБ) должны ожидать изменения порядка нескольких дБ в полученных уровнях помех по мере перемещения боковых лепестков рефлектометра через луч передатчика. Техническое решение приводит к значению 6 дБ в качестве предполагаемого максимума ожидаемого изменения $10 \log [(I_{s+n}/B_{s+n})/(I_n/B_n)]$ в течение периода измерения. Поэтому из рисунка 1а можно заключить, что максимальная спектральная плотность мощности помехи, которую любая из шести антенн с веерной диаграммой направленности рефлектометра NSCAT может выдержать без ухудшения точности измерения, равна -207 дБ(Вт/Гц) или -174 дБВт в любой ширине полосы 2 кГц в пределах ширины полосы канала обработки 1 МГц.

Как и для помехи, для белого шума максимальная приемлемая спектральная плотность мощности шума приблизительно равна -194 дБ (Вт/Гц) на входе приемника, которая преобразовывается в критерий помехи -161 дБВт в любой ширине полосы 2 кГц в пределах ширины полосы канала обработки 1 МГц.

В случае небелого шума, критерий помехи для рефлектометра, использующего направленную антенну со сфокусированной диаграммой направленности, может быть определен для наихудшего случая: $10 \log [(I_{s+n}/B_{s+n})/(I_n/B_n)] = \pm\infty$. Эта ситуация представляет случай, когда помеха присутствует для измерения "сигнал + шум" или для измерения "только шум", но не для обоих измерений одновременно.

Из рисунка 1b поэтому можно заключить, что максимальная спектральная плотность мощности помехи, которую антенна со сфокусированной диаграммой направленности NSCAT-подобного рефлектометра может выдержать без ухудшения измерения, равна -195 дБ(Вт/Гц). Это требование должно выполняться в любой ширине полосы 10 кГц в пределах ширины полосы канала обработки 1 МГц.

РИСУНОК 1b



1166-01b

Как и для помехи, для белого шума максимальная приемлемая спектральная плотность мощности помехи приблизительно равна -185 дБ(Вт/Гц) на входе приемника рефлектометра с антенной со сфокусированной диаграммой направленности.

В общедоступных диапазонах частот, готовность данных рефлектометра должна превышать 95% для всех пунктов в зоне уверенного приема датчика в том случае, когда потеря является случайной, и превышать 99% для всех пунктов, где потеря происходит систематически в одних и тех же пунктах.

4 Радары контроля осадков

В данном разделе представлена информация о критериях качества и помех для бортовых радаров контроля осадков в полосах частот 13,25–13,75 ГГц, 24,05–24,25 ГГц и 35,5–36,0 ГГц. Критерии качества и помех для активных бортовых радаров контроля осадков могут применяться при анализе совместимости активных бортовых радаров контроля осадков с радионавигационными и радиолокационными системами в этих диапазонах.

4.1 Радары контроля осадков, основанные на TRMM

Первым бортовым космическим радаром контроля осадков стал радар осадков (РО) TRMM, который был запущен в 1997 году.

Были исследованы миссия и проект РО TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) для разработки критериев качества и помех, которые впоследствии могут использоваться при оценке совместимости РО и систем в службах радиолокации и радионавигации. Критерии помех представлены как для уровня помехи, которая является критической, так и для количества данных, потерянных из-за помех, совместимых с задачами экспедиции.

4.1.1 Критерии качества

Научные требования к РО TRMM состоят в определении, после обработки данных, интенсивностей дождя, равных или больших 0,7 мм/час. Увеличение измеряемой интенсивности дождя до 0,75 мм/час не повлияет существенно на данные и является приемлемым в качестве критерия качества.

TRMM будет проводить измерения осадков всюду в пределах широт $\pm 35^\circ$, что определяется наклоном его орбиты. Важным является получение всех возможных измерений осадков, однако измерения в Межтропической зоне сходимости (МТЗС), а именно области, ограниченной экватором и 10° северной широты, а также широкой области, простирающейся от морского континента до юга Тихого океана (называемой Австралийской муссонной впадиной и Южной Тихоокеанской зоной сходимости, ЮТЗС), имеют особую важность. Эти наиболее важные области ограничены широтами 0° – 10° с. ш., долготами 50° – 180° в. д. и широтами 0° – 10° ю. ш. Тропический ливень является критически важным при распределении воды на Земле. Самые сильные осадки выпадают около экватора, и более чем две трети из них выпадают в тропиках. С осадками высвобождается энергия, которая приводит в действие мировую атмосферную циркуляцию, таким образом, формируя погоду и климат. Тропический ливень также играет ключевую роль в спорадической климатической аномалии "Эль-Ниньо", которая способствует наводнениям и ветрам по всему миру. Получение многолетних совокупностей научных данных по измерениям тропических и субтропических дождей является ключом к пониманию того, как взаимодействия между морем, воздухом и массами земли вызывают изменения глобальных осадков и климата. Такие измерения могут проводиться только при помощи спутников.

С учетом полученных ранее данных ученые, работающие по проекту TRMM, определили, что необходимая полезность данных об осадках функционально зависит от места выпадения осадков. Наиболее критическая область находится в МТЗС и возле специальных пунктов "подтверждения с земли", которые создаются для сопоставления данных РО с одновременными измерениями в земле. Критерий потери данных в МТЗС при случайной помехе равен 0,2% от возможных данных.

4.1.2 Критерии помех

Увеличение измерения интенсивности дождя от 0,7 до 0,75 мм/час соответствует ухудшению уровня шума системы на 10% из-за шумоподобной помехи. Поэтому помеха должна быть на 10 дБ ниже уровня шума системы. Так как уровень шума системы равен -140 дБВт и конечная ширина полосы РО равна 600 кГц, то критерий критического уровня помех равен -150 дБ(Вт/600 кГц). Вне диапазона 12 МГц между частотами 13,793 ГГц и 13,805 ГГц допустимый уровень помех намного выше из-за полосового фильтра приемника: -115 дБВт для 13,790–13,793 ГГц и для 13,805–13,808 ГГц; -90 дБВт для 13,75–13,79 ГГц и для 13,808–13,850 ГГц; -70 дБВт для 13,85–13,86 ГГц. Для 35,5–36,0 ГГц, критерий критического уровня помехи равен -152 дБ(Вт/600 кГц).

В совместно используемых диапазонах частот готовность данных РО должна превышать 99,8% во всех пунктах в зоне уверенного приема датчика в том случае, когда потеря является случайной.

4.2 Радары контроля осадков, основанные на модификациях TRMM

4.2.1 Введение

В данном Приложении представлены технические характеристики, критерии качества и помех для бортовых радаров контроля осадков на частоте 35 ГГц в качестве еще одного примера активных датчиков, использующих полосу частот 35,5–36,0 ГГц.

4.2.2 Последующая модель TRMM и радар контроля осадков в полосе 35 ГГц

В ноябре 1997 года был успешно запущен спутник TRMM, который стал предоставлять уникальные и полезные глобальные совокупности данных о распределении осадков, а также демонстрировать потенциальные преимущества таких данных в области климатологии, прогнозирования погоды, гидрологии и т. д. В качестве приемника спутника TRMM, планируется миссия последующей модели спутника.

Чтобы добиться более широкого покрытия широт, сравнимого с 35° широты в случае со спутником TRMM, для миссии последующей модели спутника требуется увеличение области наблюдения, а также возможность проведения более чувствительных измерений. По этим причинам планируется разместить на борту спутника, продолжающего выполнение миссии, радар контроля осадков в полосе 35 ГГц, как и радар в полосе 13 ГГц. В таблице 1 приведено краткое описание последующей модели спутника.

ТАБЛИЦА 3

Краткое описание последующей модели радара контроля осадков

Цель	Мировое измерение распределения осадков
Высота орбиты	400 км (опытная)
Наклон орбиты	60°–75°
Бортовые датчики	Радар контроля осадков 13 ГГц Радар контроля осадков 35 ГГц Микроволновой формирователь сигналов изображения, видимый/инфракрасный радиометр и т. д.

4.2.3 Технические характеристики радара контроля осадков в полосе 35 ГГц

В таблице 2 представлены технические характеристики радара контроля осадков в полосе 35 ГГц, который рассматривается в качестве одного из бортовых инструментов последующей модели спутника радара контроля осадков. Основная задача радара контроля осадков в полосе 35 ГГц заключается в проведении высокочувствительных измерений. Целевое значение минимального обнаруживаемого коэффициента отражения радара, по крайней мере, ниже 14 dBZ, а результирующей интенсивности дождя – менее 0,2 мм/час, чего невозможно достичь при помощи радара контроля осадков в полосе 13 ГГц. В сравнении с радаром контроля осадков в полосе 13 ГГц, функция сканирования лепестка для радара в полосе 35 ГГц является ограниченной. Лепесток антенны необходимо зафиксировать в точке надира либо сканировать в пределах нескольких градусов от надира.

ТАБЛИЦА 4

Характеристики последующей модели TRMM радара контроля осадков в полосе 35 ГГц (опытные)

Средняя частота РЧ	35,55 ГГц
Пиковая передаваемая мощность	200 Вт
Длительность импульса	1,67 мкс
Частота повторения импульсов	2 627 Гц
Импульсная модуляция	Отсутствует
Коэффициент усиления антенны	51,5 дБи
Ориентация антенны	Надир либо ограниченное сканирование
Диаметр антенны	1,2 м (эффективность = 0,7)
Ширина лепестка антенны	0,5°
Горизонтальное разрешение	3,5 км
Передающая ширина полосы РЧ	14 МГц
Ширина основной полосы приемника	600 кГц
Уровень шума в системе (коэффициент шума = 4 дБ)	-142 дБ(Вт/600 кГц)
Потеря на фидерной линии приема-передачи	2,5 дБ

4.2.4 Критерии качества и помех

4.2.4.1 Критерии качества

Процент слабых осадков в регионах с высокими широтами больше, чем в тропиках. Поэтому необходимо измерять слабые осадки в максимально возможном объеме, чтобы получить непредвзятую оценку статистики распределения осадков в регионах с высокими широтами. Возможность измерения осадков с интенсивностью менее 0,2 мм/час является одним из требований к измерению для радара контроля осадков миссии последующей модели спутника. По этой причине, в качестве критерия качества для радара контроля осадков в полосе 35 ГГц указан минимальный обнаружимый коэффициент отражения радара менее 14 dBZ.

4.2.4.2 Критерии помех

Коэффициент отражения радара, равный 14 dBZ, соответствует уровню интенсивности дождя 0,15 мм/час. Это значение может быть ухудшено до 0,2 мм/час. Данное ухудшение качества соответствует повышению температуры шума системы на 10%, или повышению уровня шума системы порядка 0,5 дБ. Данный критерий по существу остается неизменным для радара контроля осадков в полосе 13 ГГц. Что касается критерия потери данных из-за помехи, критерий, используемый для радара контроля осадков в полосе 13 ГГц, может применяться к радару контроля осадков в полосе 35 ГГц. Критерий помех для радара контроля осадков в полосе 35 ГГц в итоге выглядит следующим образом:

- допустимый уровень помехи: -152 дБ(Вт/600 кГц);
- допустимый объем потери данных от помехи: 0,2%.

5 Радары с синтезированной апертурой (РСА)

В данном разделе представлена информация о критериях качества и помех для бортовых активных датчиков радаров с формированием изображения в полосах частот 432–438 МГц, 1215–1300 МГц, 3100–3300 МГц, 5250–5570 МГц, 8550–8650 МГц и 9300–9900 МГц. Критерии качества и помех могут применяться при анализе совместимости активных бортовых датчиков радаров с формированием изображения с радионавигационными и радиолокационными системами в этих полосах.

5.1 Критерии качества для РСА

Радары с синтезированной апертурой (РСА) обычно используются в космосе для получения изображений радиолокационных карт нижележащих территорий, так как при движении космического корабля создается синтезированная апертура на протяжении типового времени апертуры, составляющего всего лишь около 0,2–1,5 сек. Любые сигналы, оказывающие помехи в течение этого времени апертуры, влияют на формирование сигналов изображения конкретного параметра. Многие РСА формируют изображения главным образом земли и границы "земля-вода" на побережьях. Конечное число отобранных участков выбирается экспериментаторами для получения сигналов изображения под несколькими углами обзора, так как 1–8 дневные повторяющиеся орбиты незначительно смещаются. Любая помеха, нарушающая данные, полученные с экспериментального участка на земле в течение любого угла обзора, неблагоприятно повлияет на эффективность работы. Другой способ использования РСА заключается в построении топографических карт, которые могут применяться для цифровых моделей угла места. Некоторые РСА используют интерферометрию повторных проходов для построения топографических карт. Помеха на любом из проходов неблагоприятно повлияет на эффективность работы. Один бортовой РСА пролетел по 10-дневной повторяющейся орбите на высоте 233 км и собрал данные интерферометрического РСА с фиксированной опорной линией в течение восходящих проходов, используя полосу 5250–5350 МГц и 9500–9800 МГц, в то же время, получая обычные данные РСА в полосе 1215–1300 МГц. Вторая принимающая антенна в полосе 5250–5350 МГц/9500–9800 МГц, расположенная на расстоянии 30 м от основной антенны, получала данные одновременно с основной антенной, таким образом, предоставляя интерферометрические данные без необходимости повторять проход. Режим сканирования РСА с использованием полосы 5250–5350 МГц позволил получить данные с полосы обзора шириной 230 км и обеспечил общее покрытие в пределах ± 60 градусов широты. Любая помеха любого из одновременно полученных сигналов неблагоприятно повлияет на качество работы датчика.

Требованием к формированию сигналов изображения РСА или топографическим задачам является получение 99% данных с выбранных участков на земле или границе "земля-океан". Ресурс для потерянных данных отделен от прочих источников потерь, таких как потери по причине систем космического корабля, аппаратуры РСА и т. д.

Требование готовности для данных РСА составляет 99% с учетом того, что потери являются краткими и случайно распределенными по всему интервалу времени сбора данных и области наблюдения. Влияние помехи, которая всегда присутствует в данном географическом местоположении, намного серьезнее, особенно в отобранных экспериментаторами участках, где в это же время могут проходить наземные эксперименты истинности или годности. Помехи в заданном географическом местоположении для топографических задач сканирования могут приводить к появлению пробелов на мировой карте покрытия.

5.2 Критерии помех для РСА

Критерии помех для бортовых радаров формирования сигналов изображения установлены, как это представлено в таблице 2. В данной таблице критерием помех для радаров с синтезированной апертурой является соотношение "помеха/шум" (I/N), равное -6 дБ, которое соответствует ухудшению характеристики нормированного отклонения мощности пикселя, РСА, на 10%.

Уровень помехи может быть превышен с учетом эффекта ослабления помехи дискриминации обработки РСА, а также характеристиках модуляции радиолокационных/радионавигационных систем, работающих в данной полосе частот. Эти уровни могут быть превышены не более чем для 1% изображений при систематических возникновений помехи, и не более чем для 5% при случайных возникновениях помехи.

Данные РСА для получения сигналов изображения радара обрабатываются как по дальности, так и по азимуту. Возврат точечной цели распределен линейно по частоте, как в измерениях по дальности, так и по азимуту. При обработке данные обоих измерений сопоставляются, и выигрыш в отношении сигнал/шум при обработке сигнала для эхо-сигнала обычно лежит в пределах от 20 до 40 дБ. Для сигналов шума и помехи характерны значительно более низкие выигрыши в отношении сигнал/шум при обработке сигнала. Для шума приемника выигрыш по дальности составляет почти 0 дБ. У сигналов помехи на том же выходном уровне, что и шум, выигрыши в отношении сигнал/шум при обработке сигнала различаются в зависимости от типа модуляции формы сигнала.

5.2.1 Выигрыш при обработке шума

Шум системы, связанный с портом антенны, состоит главным образом из шума антенны и шума внешнего приемника. Данный шум может быть смоделирован как белый, неизменный процесс гауссовского шума. Коррелятор процессора представляет собой главным образом согласованный фильтр для импульсов линейной частотной модуляции, или ЛЧМ-импульсов. Выигрыш при обработке по дальности для шума составляет 0 дБ. Выигрыш при обработке по азимуту равен N^2 , так как происходит когерентная интеграция N возвратов во время синтезированной апертуры, и N для шума. Существует время интеграции синтезированной апертуры, и необходима соответствующая частота повторения импульсов для обработки пикселей и достижения определенного разрешения по азимуту ρ_{AZ} следующим образом:

$$G_{N_{AZ}} = T_I PRF$$

$$T_I = \frac{\lambda R_S}{v L_{eff}}$$

$$PRF = 1,2 \frac{v}{\rho_{AZ}}$$

где:

- G_{NAZ} : выигрыш при обработке по азимуту;
- T_I : время интеграции РСА по азимуту;
- PRF : частота повторения импульсов;
- λ : длина волны;
- R_S : наклонная дальность;
- v : скорость платформы космического аппарата;
- L_{eff} : эффективная длина антенны по азимуту; и
- ρ_{AZ} : разрешающая способность по азимуту.

В качестве примера, для РСА3 в полосе 9,6 ГГц $\lambda = 0,03125$ м, $R_S = 535,8$ км под углом падения 20° , $v = 7,05$ км/с и $L_{eff} = 1,56$ м, тогда $T_I = 1,52$ с. Если $\rho_{AZ} = 1$ м, то $PRF = 8460$ Гц, и выигрыш при обработке по азимуту для шума G_{NAZ} составляет 41,1 дБ.

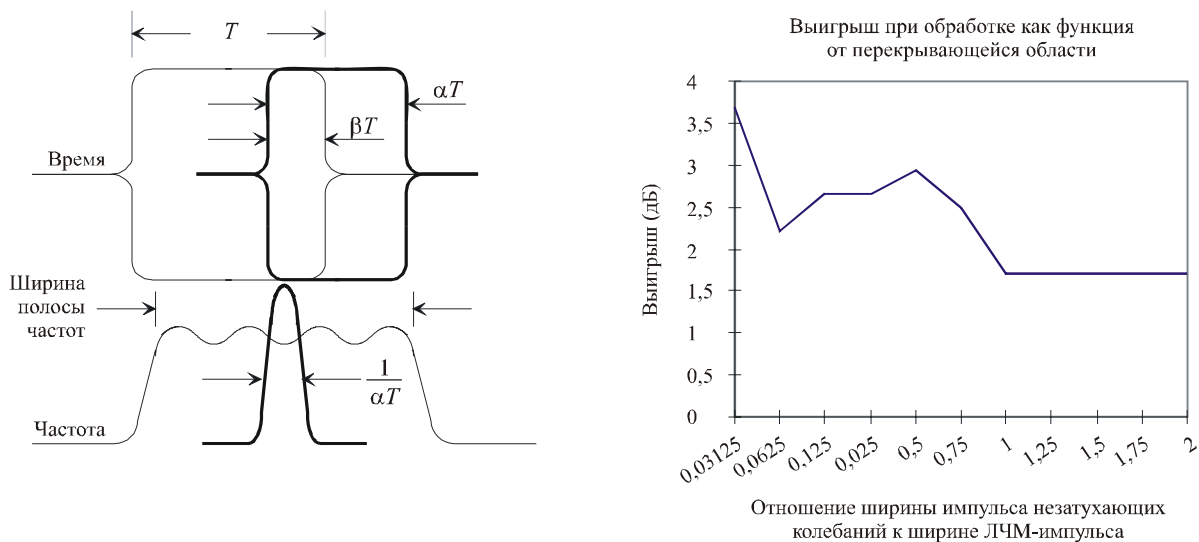
5.2.2 Выигрыш при обработке по дальности сигналов помехи

5.2.2.1 Импульсная помеха незатухающих колебаний

С учетом того, что средняя частота РЧ импульсных сигналов незатухающих колебаний помехи находится в пределах обрабатываемой полосы частот, выигрыш при обработке помехи, связанной с шумом, лежит в пределах ширины импульса незатухающих колебаний относительно ширины импульса линейной частотной модуляции, с некоторой перекрывающейся областью, как показано на рисунке 2.

РИСУНОК 2

Временные и частотные характеристики ЛЧМ-импульсов и импульсов



1166-02

С учетом того, что ширина импульса помехи меньше, чем ширина ЛЧМ-импульса, и полностью покрывается ЛЧМ-импульсом (т. е. $\alpha = \beta$), выигрыш при обработке представляет собой функцию от нецелочисленной ширины импульса на рисунке 2.

5.2.2.2 Сигналы помехи незатухающих колебаний

Предполагается, что средняя частота РЧ сигнала помехи незатухающих колебаний лежит в обрабатываемой полосе частот. Для уровня сигнала помехи, равного уровню шума, выигрыш при обработке незатухающих колебаний равен 2,3 дБ. Для каждого пикселя изображения, он остается таким же, как и для импульса незатухающих колебаний, с той же шириной, что и у ЛЧМ-импульса, соотношение ширины равно единице.

5.2.2.3 Сигналы помехи линейной частотной модуляции

Предполагается, что спектр помехи будет снижаться в пределах обрабатываемой полосы частот, и импульс помехи будет перекрывать эхо-сигнал, как показано на рисунке 1.

Сигнал ЛЧМ-импульса $f(t)$ можно представить в следующем виде:

$$f(t) = \text{rect}(t/T_1) e^{j2\pi f_0 t + j\pi \mu t^2}, \quad (1)$$

где:

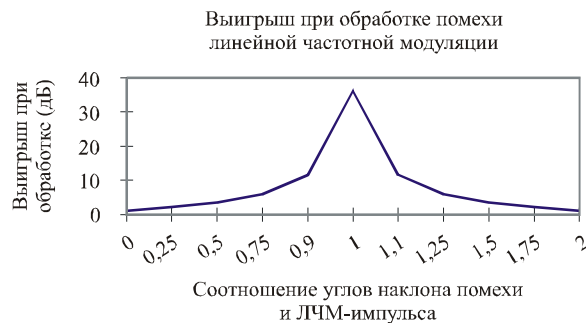
$\text{rect}(t)$: прямоугольная функция от ширины совместной области;

f_0 : несущая частота;

μ : наклон.

Выигрыш при обработке импульса помехи изменяется как соотношение наклонов $|\mu'/\mu|$ приблизительно для той же ширины импульса (т. е. $\alpha = 1$), как показано на рисунке 3. Наклон импульса помехи равен μ' , а наклон ЛЧМ-импульса радара – μ .

РИСУНОК 3



1166-03

5.2.2.4 Прочие формы сигнала/модуляции помехи

Помехи, оказываемые наземными радарными, имеют различные формы сигнала/модуляции, такие как коды Баркера, нелинейная частотная модуляция и т. д. Каждую из них можно смоделировать, а также рассчитать выигрыш при обработке относительно шума. В этой Рекомендации не рассмотрены эти модуляции. Тем не менее, даже несмотря на то, что выигрыш при обработке по дальности здесь не рассматривается, выигрыш при обработке по азимуту все же относится к импульсным формам сигнала.

5.2.3 Выигрыш при обработке по азимуту для импульсных сигналов помехи

Обработка по азимуту РСА выполняется путем сложения эхо-сигналов, когда облучение главного лепестка антенны на земле проходит через целевую область. Для шума выигрыш при обработке по азимуту равен N для интеграции N импульсов в течение синтезированной апертуры. Для импульсов помехи синхронизация сигнала помехи в пределах каждого окна дальности различается от возврата к возврату, так как у наземных радаров и у РСА различные частоты повторения импульсов. Для импульсных сигналов помехи предыдущий анализ с использованием моделирования последовательных окон дальности и сложение возвратов в течение интервала синхронизации РСА показали, что мгновенная пиковая мощность для азимутально обработанной помехи лежит в пределах от 0 дБ до 9,5 дБ.

5.2.4 Расчет допустимой помехи

Допустимые уровни помехи, как отмечено выше, могут различаться, если учитывается эффект ослабления помех при дискриминации обработки РСА и модуляционных характеристик радиолокационных/радионавигационных систем, работающих в данной полосе частот. Допустимая мощность сигнала помехи P_I выглядит следующим образом:

$$P_I = I/N \cdot P_N \cdot \frac{G_{N_{AZ}}}{G_{I_{AZ}}} \cdot \frac{G_{N_{RNG}}}{G_{I_{RNG}}}, \quad (2)$$

где:

I/N : соотношение "помеха/шум" на выходе обрабатывающего устройства;

P_N : мощность шума на порте антенны;

$G_{N_{AZ}}$: усиление шума при обработке по азимуту;

$G_{I_{AZ}}$: выигрыш при обработке по азимуту сигнала помехи;

$G_{N_{RNG}}$: выигрыш при обработке шума по дальности;

$G_{I_{RNG}}$: выигрыш при обработке сигнала помехи по дальности.

Выигрыши при обработке являются произведением выигрыша при обработке по азимуту и по дальности. Выигрыш при обработке по дальности для помехи, как правило, незначителен, менее 4 дБ; тем не менее, выигрыш при обработке по азимуту для помехи, как правило, ниже на 20–40 дБ, чем для шума. Например, в случае широкополосного РСА на полосе 9,6 ГГц, получающего помеху от бортового радара, как радар, так и РСА используют импульсы линейной частотной модуляции с достаточно различными углами наклона ЛЧМ-импульсов. Угол наклона ЛЧМ-импульса РСА составляет 45–450 МГц/мкс, а угол наклона ЛЧМ-импульса бортового радара составляет 0,5 МГц/мкс. Соотношение наклона ЛЧМ-импульса помехи и ЛЧМ-импульса РСА $|\mu'/\mu|$ составляет всего лишь 0,001–0,01, и, согласно рисунку 3, соответствующее линейное усиление при обработке находится на уровне примерно 2,3 дБ. Для $I/N = -6$ дБ, $P_N = -83,7$ дБм, $G_{N_{AZ}}/G_{I_{AZ}} = 41,1$ дБ, и $G_{N_{RNG}}/G_{I_{RNG}} = -2,3$ дБ, P_I не должна превышать $-50,9$ дБм. В таблице 3 представлен расчет выигрыша при обработке для шума минимального эталонного эхо-сигнала отклика ($SNR = 0$ дБ), а также сигнала помехи для РСА3 на полосе 9,6 ГГц, получающего сигнал помехи от бортового радара.

ТАБЛИЦА 5

Выигрыш при обработке по дальности и по азимуту для шума, сигнала и помехи для РСА3 на полосе 9,6 ГГц

Тип сигнала	Входная мощность (дБм)	Выигрыш при обработке по дальности (дБ)	Выигрыш при обработке по азимуту (дБ)	Выходная мощность (дБм)
Шум	-83,7	0,0	41,1	-42,6
Минимальный полезный сигнал	-151,3	26,5	82,2	-42,6
Максимальный допустимый сигнал помехи	-44,9	2,3	от 0,0 до 9,5	от -42,6 до -34,8

5.2.5 Характеристики входного/выходного сигнала для РСА, работающего в полосах 432–438 МГц и 1215–1300 МГц

Максимальный допустимый выходной сигнал помехи равен уровню шума в системе, или шуму принимающей антенны на выходе. В таблице 6 представлены входные/выходные динамические особенности сигнала шума, минимальный эталонный сигнал и максимальный допустимый сигнал помехи с учетом выигрыша при обработке по дальности и по азимуту. Приведены уровни как для полосы 432–438 МГц, так и для 1215–1300 МГц.

ТАБЛИЦА 6

Характеристики входного/выходного сигнала для РСА в полосах 432–438 МГц* и 1215–1300 МГц

Тип сигнала	Входная мощность (дБм)	Выигрыш при обработке по дальности (дБ)	Выигрыш при обработке по азимуту (дБ)	Выходная мощность (дБм)
Шум	-97,7 (-103,4)	0,0 (0,0)	30,6 (33,0)	-67,1 (-70,4)
Минимальный полезный сигнал	-156,5 (-164,2)	28,2 (27,8)	61,2 (66,0)	-67,1 (-70,4)
Максимальный допустимый сигнал помехи ⁽¹⁾	-69,4 (-72,7)	2,3 (2,3)	от 0 до 9,5 (от 0 до 9,5)	от -67,1 до -57,6 (от -70,4 до -60,9)

* Значения для полосы 432–438 МГц указаны в скобках.

⁽¹⁾ Применяется для импульсных источников помех не частотной модуляции с длительностью импульса не более 2 мкс. Уровни для импульсов с другой длительностью лежат в диапазоне всего лишь $\pm 0,6$ дБ.

5.2.6 Характеристики входного/выходного сигнала для РСА, работающего в полосах 3100–3300 МГц и 5250–5570 МГц

Максимальный допустимый выходной сигнал помехи равен уровню шума в системе, или шуму принимающей антенны на выходе. В таблице 7 представлены входные/выходные динамические особенности сигнала шума, минимальный эталонный сигнал и максимальный допустимый сигнал помехи с учетом выигрыша при обработке по дальности и по азимуту. Приведены уровни для постулированных радаров. Для полосы 5250–5350 МГц используются параметры для основной антенны. Тем не менее, в задачах топографической интерферометрии, для увеличения энергии сигнала и использования телескопической антенны длиной всего 8 м с малошумящими усилителями на каждой визирке угла возвышения может использоваться импульс шириной 66 мкс в целях снижения уровня шума.

Для номинального случая в ней показано, какой уровень сигнала помехи на входе равен той же мощности шума на соответствующем выходе. На этих уровнях входа не будет выходного насыщения внутреннего приемника ввиду того, что насыщения не происходит для других 18 дБ. Точка компрессии внешнего приемника в 1 дБ составляет -22 дБм на входе. Максимальная входная управляемая мощность приемника составляет +37 дБм. Таким образом, максимальный допустимый сигнал помехи все еще намного меньше, чем необходимо для компрессии или управления максимальной мощностью.

ТАБЛИЦА 7

**Характеристики входного/выходного сигнала для РСА
в полосах 3100–3300 МГц* и 5250–5570 МГц**

Тип сигнала	Входная мощность (дБм)	Выигрыш при обработке по дальности (дБ)	Выигрыш при обработке по азимуту (дБ)	Выходная мощность (дБм)
Шум	–96,7 (–99,3)	0,0 (0,0)	24,2 (27,7)	–72,5 (–71,6)
Минимальный полезный сигнал	–149,1 (–156,0)	28,2 (29,0)	48,4 (55,4)	–72,5 (–71,6)
Максимальный допустимый сигнал помехи ⁽¹⁾	–74,8 (–73,9)	2,3 (2,3)	от 0 до 9,5 (от 0 до 9,5)	от –72,5 до –63,0 (от –71,6 до –62,1)

* Значения для полосы 3100–3300 МГц указаны в скобках.

(1) Применяется для импульсных источников помех не частотной модуляции с длительностью импульса не более 2 мкс. Уровни для импульсов с другой длительностью лежат в диапазоне всего лишь $\pm 0,6$ дБ.

5.2.7 Характеристики входного/выходного сигнала для РСА, работающего в полосах 8550–8650 МГц и 9300–9900 МГц¹

Максимальный допустимый выходной сигнал помехи равен уровню шума в системе или шуму принимающей антенны на выходе. В таблице 8 представлены входные/выходные характеристики сигнала шума, минимальный полезный сигнал и максимальный допустимый сигнал помехи с учетом выигрыша при обработке по дальности и по азимуту. В ней показано, что низкий сигнал помехи в пределах от –74,5 до –75,0 дБм на входе равен той же мощности шума на соответствующем выходе. На этом уровне входа не будет насыщения внутреннего приемника ввиду того, что насыщения не произойдет до тех пор, пока входной сигнал не достигнет –56 дБм при значении усиления приемника, равном 60 дБ. Точка компрессии внешнего приемника в 1 дБ составляет –22 дБм на входе. Максимальная входная управляемая мощность приемника составляет +37 дБм. Таким образом, максимальный допустимый сигнал помехи в пределах от –74,5 до –75,0 дБм все еще намного меньше, чем необходимо для насыщения или максимальной управляемой мощности.

ТАБЛИЦА 8

**Характеристики входного/выходного сигнала для РСА
в полосах 8550–8650 МГц* и 9300–9900 МГц**

Тип сигнала	Входная мощность (дБм)	Выигрыш при обработке по дальности (дБ)	Выигрыш при обработке по азимуту (дБ)	Выходная мощность (дБм)
Шум	–94,0 (–94,5)	0,0 (0,0)	21,8 (21,8)	–72,2 (–72,7)
Минимальный полезный сигнал	–145,3 (–145,8)	29,5 (29,5)	43,6 (43,6)	–72,2 (–72,7)
Максимальный допустимый сигнал помехи ⁽¹⁾	–74,5 (–75,0)	2,3 (2,3)	от 0 до 9,5 (от 0 до 9,5)	от –72,2 до –62,7 (от –72,7 до –63,2)

* Значения для полосы 8550–8650 МГц указаны в скобках.

(1) Применяется для импульсных источников помех не частотной модуляции с длительностью импульса не более 2 мкс. Уровни для импульсов с другой длительностью лежат в диапазоне всего лишь $\pm 0,6$ дБ.

¹ См. соответствующие решения ВКР-07.

5.2.8 Критерии помех

Критерии неприемлемого ухудшения эффективности работы радаров с синтезированной апертурой, формирующих сигналы изображения, или топографических интерференционных РСА представляют собой пиковые мощности:

432–438 МГц	–109 дБВт/6 МГц
1215–1300 МГц	–106 дБВт/20 МГц
3100–3300 МГц	–110 дБВт/20 МГц
5250–5570 МГц	–111 дБВт/20 МГц
8550–8650 МГц	–111 дБВт/20 МГц
9300–9900 МГц	–110 дБВт/20 МГц*

* См. соответствующие решения ВКР-07.

Данные критерии распространяются на импульсные источники помех не частотной модуляции с длительностью импульса не более 2 мкс. Для импульсов с другой длительностью критерии отличаются лишь на $\pm 0,6$ дБ.

5.2.9 Критерий готовности

В совместно используемых полосах частот готовность данных РСА должна превышать 99% всех географических пунктов, являющихся целевыми отобранными участками или глобального покрытия в топографической картографии.

6 Радары профилирования облачности

В данном разделе представлена информация о критериях качества и помех для бортовых радаров профилирования облачности в полосах частот 94,0–94,1 ГГц, 133,5–134,0 ГГц, и 237,9–238 ГГц.

6.1 Критерии качества для радара профилирования облачности в полосе 94 ГГц

Целью бортового профилирования облачности является измерение профилирования отражения для всех облаков в зоне видимости с минимальным коэффициентом отражения, равным -30 dBZ.

6.2 Критерии помех для радара профилирования облачности

Помеха должна ухудшить значение Z_{min} менее чем на 10% на 95% зоны обслуживания. Десятипроцентное ухудшение значения Z_{min} соответствует соотношению "помеха-шум" на уровне -10 дБ. Данный критерий помехи соответствует уровню мощности помехи, равному -155 дБВт через 300 кГц.

6.3 Критерий готовности для радара профилирования облачности

Для случайных сигналов помехи, помеха должна ухудшить значение Z_{min} менее чем на 10% на 95% зоны обслуживания. Если сигнал помехи не является случайным, то он должен ухудшить значение Z_{min} менее чем на 10% на 99% предполагаемой зоны обслуживания.