

РЕКОМЕНДАЦИЯ МСЭ-R S.1427-1

Методика и критерий для оценки помех от передатчиков наземной системы беспроводного доступа/локальной радиосети*, создаваемых фидерным линиям негеостационарной подвижной спутниковой службы в полосе частот 5150–5250 МГц**

(Вопрос МСЭ-R 248/4)

(2000-2006)

Сфера применения

В настоящей Рекомендации приводится методика и критерий, которые позволяют оценить помехи от передатчиков наземной СБД/ЛРС, создаваемых фидерным линиям НГСО ПСС (Земля-космос) в полосе частот 5150–5250 МГц, отражая также результаты работы ВКР-03, касающиеся этой проблемы.

Ассамблея радиосвязи МСЭ,

учитывая,

- a) что возможное широкомасштабное развертывание передатчиков наземной системы беспроводного доступа/локальной радиосети СБД/ЛРС в полосе частот 5150–5250 МГц может стать причиной помех, создаваемых спутниковым системам негеостационарной подвижной спутниковой службы ГСО ПСС, эксплуатирующими свои фидерные линии в этой полосе частот;
- b) что возможное широкомасштабное развертывание передатчиков СБД/ЛРС в полосе частот 5150–5250 МГц может привести к заметному уменьшению пропускной способности спутниковых транспондеров ПСС;
- c) что передатчики СБД/ЛРС в полосе частот 5150–5250 МГц во многих странах работают на безлицензионной основе или на основе лицензии, выданной определенному классу;
- d) что охват луча фидерной линии НГСО ПСС имеет региональную или глобальную природу;
- e) что помехи от СБД/ЛРС могут учитываться только в виде суммарного и постоянного увеличения уровня шума фидерной линии НГСО ПСС и последствий этого увеличения в виде снижения пропускной способности спутника;
- f) что в п. 3 раздела *решает* в Резолюции 229 (ВКР-03) говорится, что администрации могут контролировать были ли превышены или будут ли превышены в будущем уровни суммарной п.п.м., указанные в Рекомендации МСЭ-R S.1426, с тем чтобы какая-либо будущая компетентная конференция предприняла соответствующие действия;
- g) что требуется метод оценки помех от излучений СБД/ЛРС, создаваемых приемникам фидерных линий НГСО ПСС, а также метод обработки результатов измерений;
- h) что развитие рынка СБД/ЛРС будет происходить независимо на национальной или региональной основе;

* В настоящей Рекомендации СБД/ЛРС обозначает систему беспроводного доступа/локальную радиосеть или любые другие транспортируемые или стационарные устройства, обеспечивающие соединение в локальной сети (например, высококачественные локальные радиосети (HIPERLAN), U-NII, беспроводные локальные сети (WLAN), или иные; см. также Рекомендации МСЭ-R F.1244 и МСЭ-R M.1450).

** Настоящая Рекомендация должна быть доведена до сведения 8-й и 9-й Исследовательских комиссий по радиосвязи для информации.

- j) что необходимо защищать фидерные линии НГСО ПСС от помех со стороны СБД/ЛРС,
отмечая,
- a) что в полосе частот 5150–5250 МГц в дополнение к помехам от передатчиков СБД/ЛРС работают и иные источники помех (включая нежелательные излучения от передатчиков в ближайших полосах частот), создаваемых фидерным линиям НГСО ПСС;
- b) что методики, приведенные в Приложениях 1, 2 и 3 применимы только к НГСО группировкам с большим количеством спутников, которые находятся друг от друга на достаточно большом расстоянии,
признавая,
- a) что полоса частот 5150–5250 МГц распределена на всемирной основе фиксированной спутниковой службе (ФСС) (Земля-космос) только для совместного использования на первичной основе фидерными линиями НГСО без ограничений по времени, как сказано в п. 5.447А Регламента радиосвязи (РР);
- b) что полоса частот 5150–5250 МГц также распределена на всемирной первичной основе воздушной радионавигационной службе (ВРНС);
- c) что полоса частот 5150–5216 МГц также распределена фидерным линиям спутниковой службы радиоопределения (космос-Земля) в соответствии с п. 5.446 Регламента радиосвязи;
- d) что полоса частот 5150–5216 МГц, в соответствии с п. 5.447В и положениями п. 9.11А Регламента радиосвязи, также распределена фиксированной спутниковой службе (ФСС) (космос-Земля) для использования фидерными линиями НГСО ПСС на всемирной первичной основе;
- e) что полоса частот 5150–5250 МГц распределена подвижной службе в соответствии с пп. 5.446А, 5.446В Регламента радиосвязи и Резолюцией 229 (ВКР-03);
- f) что, согласно п. 5.447 Регламента радиосвязи полоса частот 5150–5250 МГц во многих странах распределена подвижной службе, и подчиняется правилам координации в соответствии с п. 9.21 Регламента радиосвязи;
- g) что Резолюция 229 (ВКР-03) ограничивает возможность передач СБД/ЛРС только передачами внутри помещений,

рекомендует

- 1** чтобы оценка помех от излучений СБД/ЛРС, создаваемых приемникам спутниковых фидерных линий НГСО ПСС, работающим в полосе частот 5150–5250 МГц, основывалась на увеличении ($\Delta T_{satellite}$) шумовой температуры спутника ($T_{satellite}$);
- 2** для обеспечения требуемой защиты фидерных линий НГСО ПСС в полосе частот 5150–5250 МГц, чтобы суммарная величина $\Delta T_{satellite}/T_{satellite}$, создаваемая излучениями СБД/ЛРС, не превышала 3%;
- 3** при измерении помех от излучений, создаваемых приемнику СБД/ЛРС спутниковой фидерной линии НГСО ПСС, применять методику, описанную либо в Приложении 2, либо в Приложении 3 к настоящей Рекомендации для системы фидерной линии НГСО ПСС, испытывающей помеху. Исходную информацию по этим методикам можно найти в Приложении 1;
- 4** чтобы последующие Примечания рассматривались как часть настоящей Рекомендации.

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Влияние суммарной продолжительной помехи со стороны СБД/ЛРС, создаваемой фидерным линиям НГСО ПСС, в том что касается снижения пропускной способности спутника НГСО ПСС, также должно рассматриваться вместе с методикой, предложенной в вышеприведенных пунктах раздела *рекомендует*. Это гарантирует, что мощность помехи, принимаемой спутниками НГСО ПСС, должна приводить к снижению доступной пропускной способности спутника не более чем на 1%. Для определения этой величины могут потребоваться дальнейшие исследования.

ПРИМЕЧАНИЕ 2. – Под термином "суммарный" понимается, что помеха в приемном луче спутника должна рассчитываться от всех устройств СБД/ЛРС, находящихся в поле зрения приемного луча спутника НГСО ПСС.

ПРИМЕЧАНИЕ 3. – В Приложениях 2 и 3 к настоящей Рекомендации описывается два альтернативных варианта внедрения на спутнике бортовой аппаратуры измерения для определения суммарного шума и помех, которые могли бы быть приняты рабочим спутником того же самого типа, что и остальные спутники в группировке. Более того, в этих Приложениях также описываются соответствующие методы обработки (на земле) результатов измерений, выполненных на спутнике.

ПРИМЕЧАНИЕ 4. – Методики, описанные в Приложениях 2 и 3, могут использоваться для измерения суммарных помех, создаваемых приемнику фидерной линии космической станции в любой спутниковой системе НГСО ПСС. Для получения наглядных результатов используются технические параметры группировки LEO-D, описанные в Рекомендации МСЭ-R М.1184. Для определения того, какая часть суммарной помехи поступает от передатчиков СБД/ЛРС, могут потребоваться дополнительные исследования. Эти исследования могут быть выполнены наилучшим образом, когда имеются результаты измерений, полученные с применением одной из методологий, описанных в Приложениях 2 и 3.

Приложение 1

Измерение суммарного шума и помех, создаваемых приемнику космической станции фидерной линии диапазона 5 ГГц спутниковой системы ПСС LEO-D

1 Введение

В настоящем Приложении описывается, как измеряется суммарная помеха на приемной антенне приемника космической станции фидерной линии диапазона 5 ГГц (Земля-космос) спутниковой системы НГСО ПСС. Учитывая, что общей целью Приложения 2 или 3 является возможность с высокой точностью оценить амплитуду суммарной помехи от ЛРС, в настоящем Приложении в общих чертах описывается, как может быть выполнено измерение суммарной мощности, принимаемой спутниковой антенной, со среднеквадратической ошибкой примерно 0,03% от теплового и фонового шума на линии вверх.

2 Приемник с модуляционным радиометром

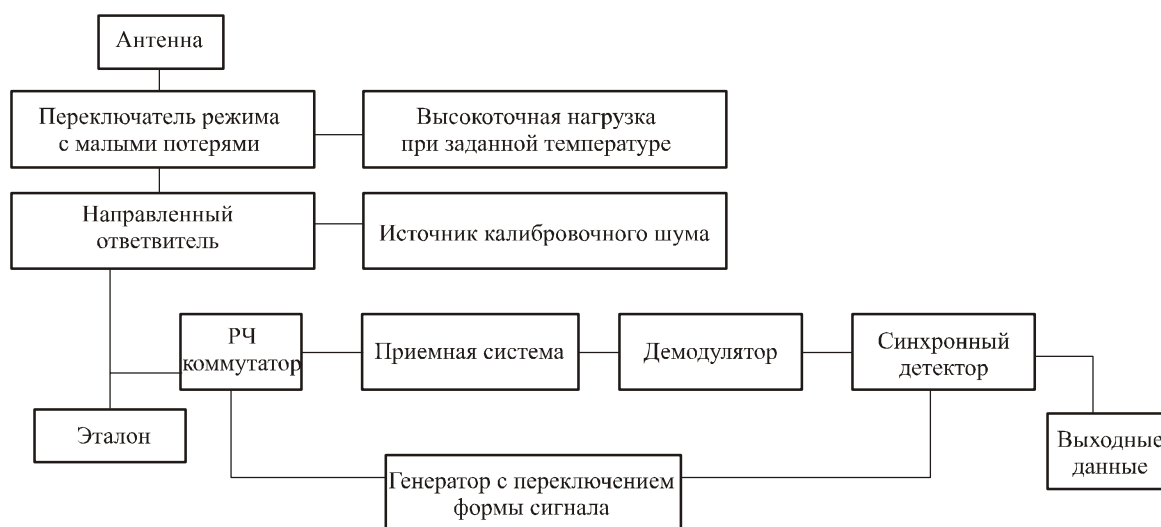
Приемник с модуляционным радиометром десятки лет используется радиоастрономическим сообществом и другими пользователями для измерения очень низких уровней гауссовского шума в окружении намного больших уровней гауссовского шума в самом приемнике. Рассматриваемое здесь применение является почти идентичным, так как суммарный мешающий сигнал от очень большого числа передающих устройств ЛРС будет иметь стохастические гауссовские характеристики, не зависящие от точных характеристик отдельных излучений. Также стохастические характеристики фонового шума приемника будут гауссовскими в применениях (пассивных) исследования Земли со спутника, применениях (пассивных) космических исследований, радиоастрономических применениях и в применениях измерения помех со стороны СБД/ЛРС, описанных в настоящей Рекомендации.

Блок-диаграмма общего модуляционного радиометра показана на рисунке 1. Как правило, модуляционный радиометр создается вокруг блока "приемной системы", который, до добавления к нему блоков модуляционного радиометра, фактически представляет собой приемник фидерной линии ПСС в диапазоне 5 ГГц. Дополнительные блоки добавляются, для того чтобы дать возможность приемнику:

- интегрировать в течение времени измерений τ ; выделенную огибающую широкополосного гауссовского сигнала в РЧ и ПЧ цепях самого спутникового приемника;
- калибровать свои измерения так, чтобы изменение коэффициента усиления приемника во времени не влияли на точность измерений, и так, чтобы оценки измеряемого уровня шума не включали в себя внутренний шум приемника.

Для выполнения этих задач используется два источника эталонного шума, и сравниваются с входным гауссовским сигналом, который должен быть измерен. Один из этих эталонных сигналов аналогичен шуму в приемнике, а другой – сопоставим с внешним измеряемым сигналом.

РИСУНОК 1
Общий модуляционный радиометр



1427-01

3 Характеристики модуляционного радиометра

Модуляционный радиометр разработан так, чтобы быстро переключаться с антенны на эталонную нагрузку или источник шума, со скоростью, превышающей самые быстрые изменения коэффициента усиления. Как правило, флуктуации коэффициента усиления имеют спектр, простирающийся до, как минимум, 5 Гц, поэтому РЧ коммутатор должен переключаться между антенной и эталонной нагрузкой с частотой, как минимум, 30 Гц или около того. Тогда изменения коэффициента усиления работают только при различии между входными сигналами. Теоретически, следовательно, эталонная температура должна быть максимально возможно близкой к температуре антенны. Антенна, направленная в сторону земли, будет всегда иметь температуру антенны, как минимум, 150 К или около того (если в луч антенны попадает не только земная поверхность, то более вероятно, что она будет равна примерно 250 К). Следовательно, согласованная нагрузка или источник шума будут реальными эталонными параметрами. В действительности можно использовать аттенуатор на PIN-диоде, для того чтобы согласовать входные сигналы на приемнике, так чтобы приемник всегда был бы сбалансирован.

Калибровка источника шума добавляет в приемник известную величину шума, увеличивая входной сигнал на известную величину. Переключение на согласованную нагрузку является полезной добавкой к процессу калибровки, благодаря чему можно откалибровать фоновый шум. Однако когда вместо антенны присоединяется согласованная нагрузка, уровень фонового шума изменится.

Выходной сигнал модуляционного радиометра – это несмещенное измерение уровня мощности сигнала, принятого спутниковой антенной диапазона 5 ГГц в полосе пропускания B приемника. Среднеквадратическая ошибка этого измерения составляет:

$$\Delta T_{error} = T_{sys}/(B\tau)^{0.5}, \quad (1)$$

где:

ΔT_{error} : среднеквадратическая ошибка измерения шумовой температуры случайного сигнала на выходе антенны

T_{sys} : шумовая температура совокупного шума в приемнике, сумма шумовой температуры спутникового приемника и шумовой температуры принятого сигнала, как описано в Рекомендации МСЭ-R SA.515

B : ширина полосы пропускания (Гц) приемника

τ : время интегрирования приемника (s).

Если измеряемый уровень шума составляет 3% от совокупного шума в приемнике и требуется, чтобы среднеквадратическая ошибка измерения этой величины составляла бы порядка 1% от результата измерения, величина $(B\tau)^{-0.5}$ должна быть порядка 3×10^{-4} .

4 Радиометры, пригодные для использования в системе LEO-D

Схемы радиометров, используемых в системе LEO-D, могут быть упрощены, если можно измерять шум в эталонном канале в ближайшей эталонной полосе частот, расположенной непосредственно ниже частоты 5150 МГц, и затем использовать эти результаты измерений для оценки помех выше частоты 5150 МГц. Использование этой возможности позволит упростить орбитальный радиометр, необходимый для точного измерения суммарных помех, создаваемых работе спутникового приемника в полосе частот 5150–5250 МГц, по сравнению с общим модуляционным радиометром, показанным на рисунке 1. Далее такая модификация измерений, выполняемых с применением радиометра, меняет представление о том, какие данные из результатов орбитальных измерений требуется обрабатывать на Земле для получения результата измерения суммарной помехи.

Это упрощение радиометра, используемого на спутнике LEO-D, основывается на следующих пяти наблюдениях:

- В Рекомендации МСЭ-R S.1427 не устанавливается предел для суммарных помех I от устройств СБД/ЛРС. Наоборот, она ограничивает отношение этой помехи к уровню фонового шума N , или отношение I/N , эквивалентное отношению $\Delta T/T$ на спутниковом приемнике, которое не должно превышать 3%.
- В системе LEO-D, которая работает на частотах от 5091 МГц до 5250 МГц, имеется восемь РЧ каналов, каждый шириной 16,5 МГц. Каналы 1 и 2 работают полностью ниже частоты 5150 МГц – самой низкой рабочей частоты устройств СБД/ЛРС. Канал 3 работает с граничной частотой 5150 МГц, а каналы 4–8 включительно работают выше частоты 5150 МГц, в условиях, когда они могут создавать помехи СБД/ЛРС.
- Фоновый шум N в диапазоне частот от 5091 МГц до 5250 МГц меняется не очень ощутимо, хотя могут быть некоторые небольшие изменения.
- В двух нижних РЧ каналах и пяти верхних каналах обычным явлением являются медленные изменения величины N – для фонового шума N . Причины этого изменения N во времени могут быть не известны, но эти изменения добавляются к изменениям шума в двух нижних РЧ каналах.
- Могут существовать более быстрые изменения усиления спутниковых составляющих с частотами около 10 Гц, которые следует учитывать при наблюдениях, выполняемых с целью оценки помехи I .

Определяя, как эффективно использовать эталонные сигналы в каналах 1 и 2 для оценки отношения I/N в каналах 4, 5, 6, 7 и 8, можно увидеть, что "калибровку" радиометра можно выполнить в ходе выполнения измерений в каналах 1 и 2. Дополнительным преимуществом этого подхода является то, что все изменения уровня фонового шума во времени в различных каналах шириной 16,5 МГц из-за изменения положения спутника и время, требуемое на такое измерение, включаются в результат одновременного измерения уровня шума в каналах 1 и 2 и зависят от небольших изменений уровня фонового шума в полосе частот 5091–5250 МГц.

Два радиометра, описанные в Приложениях 2 и 3 соответственно, учитывают вышеприведенные наблюдения. В обоих этих радиометрах сигналы "калибровки" могут соответствовать уровням шума в каналах 1 и 2, поскольку изменение уровней шума в каналах с 4 по 8 включительно полностью учтено в изменении уровней шума в каналах 1 и 2. Благодаря этому, калибровочный источник шума с температурой 550 К и точная нагрузка с температурой 16,5 К на рисунке 1 являются избыточными, и, следовательно, могут быть удалены из блок-диаграмм обоих радиометров, описанных в Приложениях 2 и 3.

Приложение 2

Радиометр с встроенным переключателем для измерения суммарных шумов и помех, создаваемых приемнику фидерной линии Земля-космос диапазона 5 ГГц ПСС спутниковой системы LEO-D

1 Введение

В настоящем приложении описывается один из двух вариантов реализации радиометра, который должен использоваться на космической станции LEO-D для измерения суммарных шумов и помех в его каналах 4–8 включительно. Далее описывается обработка результатов этих измерений на земле для оценки отношения I/N из-за помех со стороны ЛРС.

2 Бортовой радиометр с встроенным переключателем

Описанный здесь радиометр использует результаты измерения теплового шума в каналах 1 и 2, а не результаты измерения двух внутренних источников калибровочного шума, которые применяются в общем модуляционном радиометре, показанном на рисунке 1. Это возможно, благодаря тому, что каналы 1 и 2 сети LEO-D L работают ниже частоты 5150 МГц и, следовательно, не испытывают помех со стороны излучений ЛРС в полосе 5150–5250 МГц.

Этот радиометр отличается от показанного на рисунке 1 тем, что:

- не имеет калибровочного источника шума, точной нагрузки или направленного ответвителя или переключателя режимов с малыми потерями, показанных на рисунке 1;
- содержит демодулятор и синхронный детектор в каждом из восьми каналов шириной 16,5 МГц в диапазоне 5 ГГц. Выходной сигнал восьми синхронных детекторов преобразуется в цифровое представление выходных сигналов синхронных детекторов, которое каждые ξ миллисекунд должно передаваться на земную станцию. Номинальное значение $\xi = 25$ мс, но оно может быть сокращено для уменьшения влияния случайных изменений результатов измерений из-за преобразования аналоговых результатов измерений на спутнике в цифровой формат до передачи на землю.

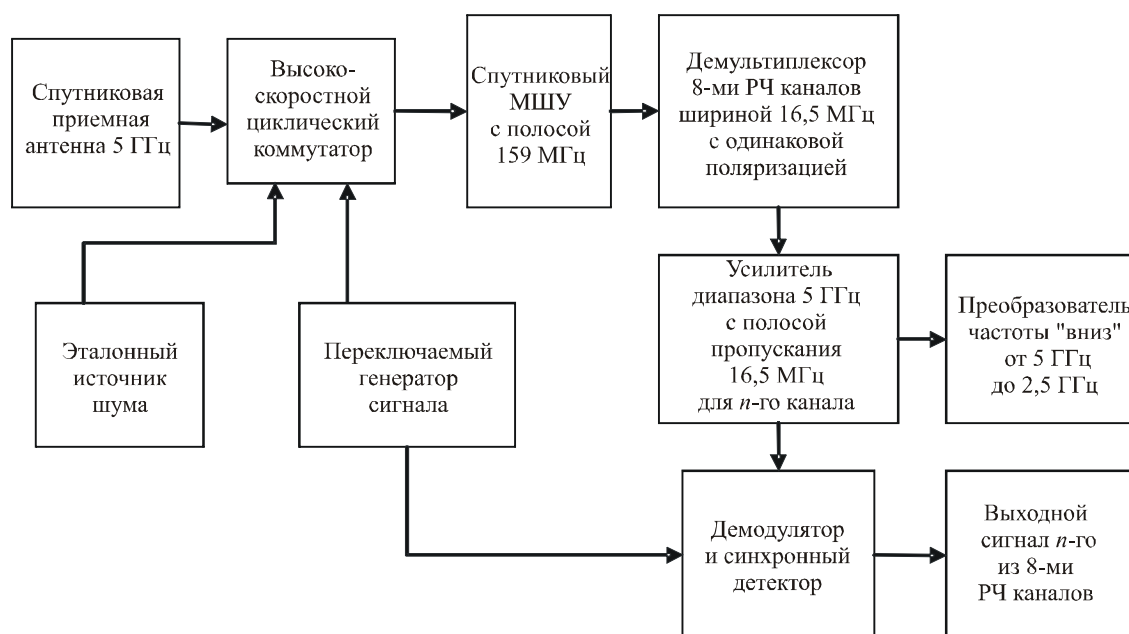
Диаграмма этого радиометра показана на рисунке 2. В дополнение к приемнику диапазона 5 ГГц рабочей сети LEO-D спутниковая нагрузка диапазона 5 ГГц включает в себя:

- Встроенный высокоскоростной циклический коммутатор, переключающийся со спутниковой антенны на эталонный источник шума каждые ξ мс.
- Стабильный источник эталонного шума с температурой 200 К.
- Демодулятор и синхронный детектор в каждом из восьми каналов системы LEO-D шириной 16,5 МГц с одинаковой поляризацией.
- Аналогово-цифровой преобразователь на выходе каждого из восьми выходных синхронных детекторов для получения η -битового цифрового представления каждого результата измерений. Номинальное значение $\eta = 12$, но оно может меняться в зависимости от точной схемы радиометра.
- Коммутируемый генератор импульсов для управления согласованием во времени синхронных детекторов и циклического коммутатора.
- Средства для передачи восьми цифровых сигналов на землю по линиям космос-Земля спутниковой сети LEO-D в диапазоне 2,5 ГГц или 7 ГГц.

Радиометр одновременно измеряет восемь выходных сигналов детектора $\{S_1, S_2, \dots, S_7, S_8\}$ в течение ξ миллисекундного интервала, во время которого встроенный коммутатор соединяет спутниковый приемник диапазона 5 ГГц либо с приемной антенной RHCP, либо с его приемной антенной LHCP. В течение следующих ξ мс радиометр одновременно измеряет восемь выходных сигналов детектора $\{R_1, R_2, \dots, R_7, R_8\}$ в то время как встроенный коммутатор соединяет спутниковый приемник диапазона 5 ГГц с эталонным источником шума. Эти 16 результатов измерений преобразуются в цифровой формат и передаются на землю для дальнейшей обработки. Это процесс повторяется каждые 2ξ мс. Время и действие каждой составляющей радиометра управляется генератором управления коммутацией.

РИСУНОК 2

Радиометр с циклически подключаемым эталонным источником шума



3 Обработка выходного сигнала радиометра на земле при помощи встроенного коммутатора

Здесь описываются вычисления в реальном времени на земле для преобразования наборов результатов измерений $\{S_1, S_2, \dots, S_7, S_8\}$ и $\{R_1, R_2, \dots, R_7, R_8\}$, которые передаются со спутника каждые ξ мс в значения отношений помеха-тепловой шум I/N для каналов 4, 5, 6, 7 и 8. Обратите внимание, что термины $\{S_i\}$, $\{R_i\}$ и $\{(I/N)_i\}$ – это уровни мощности и отношения; в последующие уравнения не включены измерения в дБ. 16 значений $\{S_i\}$ и $\{R_i\}$ и пять результатов $\{(I/N)_i\}$, которые получаются каждые 2ξ мс, могут также сохраняться для последующей обработки данных. Такая обработка, скорее всего должна включать в себя усреднение на цифровом фильтре результатов $\{S_i\}$ и $\{R_i\}$ за продолжительный период, например 1 минуту и более, который ограничивается только изменениями реально наблюдаемых помех при изменении области обслуживания спутника. Такое усреднение снизило бы случайные ошибки в результатах $\{S_i\}$ и $\{R_i\}$, включая шум квантования, создаваемый аналогово-цифровым преобразователем спутника, на корень квадратный от числа интервалов по 2ξ , в течение которых выполняется усреднение.

Первым шагом этих наземных вычислений является определение отрезков "нормализованного" сигнала $\{S_i\}$ путем деления сигналов на соответствующий эталонный сигнал из набора $\{R_i\}$ для получения набора $\{X_i\}$, где

$$X_i = S_i / R_i. \quad (2)$$

Обработка результатов измерения радиометра включает в себя деление амплитуды принятого сигнала на эталонный сигнал, а не вычитание амплитуды эталонного сигнала из амплитуды принятого сигнала. Однако изменения коэффициента усиления в спутниковом приемнике и различия коэффициентов усиления в различных каналах в уравнении (2) были исключены. Радиометр формирует объективные оценки точных значений $\{S_i\}$ и $\{R_i\}$. Случайная составляющая или изменение величины X_i равно сумме изменений S_i и R_i , поскольку как и ранее случайные составляющие этих двух величин по статистике независимы друг от друга.

Следующая задача обработки данных – оценить тепловой шум, или, точнее, "нормализованный" тепловой шум, в каждом из восьми каналов. Предполагается, что X_1 и X_2 – это нормализованные оценки только теплового шума, но следует учесть, что уровни теплового шума в разных каналах могут быть частотно-зависимыми. Ожидается, что эти изменения будут малы, и, следовательно, их можно смоделировать как линейное изменение с изменением несущей частоты. В таком случае определим изменяющуюся составляющую теплового шума Δ как:

$$\Delta = X_2 - X_1. \quad (3)$$

Эта скорость изменения теплового шума в различных каналах в реальном времени в зависимости от частоты может быть использована для оценки нормализованных компонентов теплового шума $\{X_4, X_5, X_6, X_7, X_8\}$ в виде:

$$N_i = X_1 + (i - 1) \Delta. \quad (4)$$

В уравнении (4) предполагается, что скорость изменения Δ в компоненте теплового шума остается одинаковой для всех соседних каналов от канала 4 до канала 8. После того, как получена оценка шума N_i в каналах 4–8, помеха I_i в i -том канале может быть оценена следующим образом:

$$I_i = X_i - N_i, \quad \text{для } i = 4, 5, 6, 7 \text{ или } 8 \quad (5)$$

Остаток "нормализованных" оценок $\{X_i\}$ и $\{N_i\}$ можно исключить из оценки отношений помеха-шум $\{(I/N)_i; i = 4, 5, 6, 7 \text{ и } 8\}$, поскольку и в $\{X_i\}$, и в $\{N_i\}$ использована одна и та же нормализация. При таких пояснениях, получим:

$$(I/N)_i = I_i / N_i, \quad \text{для } i = 4, 5, 6, 7 \text{ или } 8 \quad (6)$$

Отметим снова, что термины $\{(I/N)_i; i = 4, 5, 6, 7 \text{ и } 8\}$ – это отношения мощностей, а не величины в дБ.

Эти пять уравнений можно объединить в единое уравнение, которое выразит отношение помеха-шум $(I/N)i$ в единицах $\{Si\}$ и $\{Ri\}$ при помощи уравнения:

$$\begin{aligned} (I/N)i &= \{(Si/Ri)/\{(i-1)S_2/R_2 - (i-2)S_1/R_1\}\} - 1 \\ &= \{Xi / \{(i-1)X_2 - (i-2)X_1\}\} - 1 \end{aligned} \quad (7)$$

Именно эти шесть уравнений решаются на земле каждые 2ξ мс для получения оценки уровней агрегатных помех в каналах 4–8 в спутниковом приемнике LEO-D диапазона 5 ГГц.

4 Ошибка в измерениях $\{Si\}$ и $\{Ri\}$

Радиометр формирует объективные оценки уровней мощности $\{Si\}$ и $\{Ri\}$ восьми выходов приемника с гауссовским шумом. Эти уровни мощности пропорциональны соответствующим значениям шумовой температуры T_x и могут быть выражены в ее единицах. Как показано в уравнении (1), среднеквадратическая ошибка ΔT_{error} в этих измерениях T_x из-за ограниченного времени интегрирования случайных выходных сигналов радиометра составляет:

$$\Delta T_{error} = T_x / (B \xi)^{0,5} \quad (8)$$

Точно также, объективная оценка T_x страдает от воздействия мультипликативных ошибок из-за ее квантования в аналогово-цифровом преобразователе при переводе в цифровой формат, в котором она может быть передана на землю для дальнейшей обработки. Если аналогово-цифровой преобразователь выражает аналоговое значение T_x при помощи бинарного числа с η цифрами, то среднеквадратическая ошибка цифрового представления величины T_x равна:

$$T_x / 2^{(\eta-0,5)}, \quad (9)$$

где математическое ожидание T_x равно половине максимального значения на входе аналогово-цифрового преобразователя, а среднеквадратическая ошибка квантования равна 0,707 от наименьшего уровня квантования аналогово-цифрового преобразователя.

При оценке среднеквадратической ошибки в результатах $\{(I/N)i, i = 4, 5, 6, 7, 8\}$, как показано в уравнении (7), имеются места, когда складываются два случайных числа, места, где два случайных числа перемножаются, и места, где одно случайное число делится на другое. Если эти два числа статистически независимы и если изменения случайных составляющих невелико по отношению к их математическому ожиданию, то изменение результата будет примерно равно сумме изменений двух входных величин. Изменение результата $A \cdot X$, где A – постоянная, а X – случайная переменная, в A^2 раз больше, чем изменение переменной X .

Выражения для значений $\{(I/N)i, i = 4, 5, 6, 7, 8\}$ были бы слишком сложными, если бы параметры ξ и η в анализе оставались параметрическими переменными. Во избежание такой сложности, в последующем анализе среднеквадратических ошибок для значений $\{(I/N)i, i = 4, 5, 6, 7, 8\}$ используются заранее установленные значения $\xi = 25$ мс и $\eta = 12$. Далее, предполагается, что *только для этих оценок среднеквадратических ошибок* фоновый гауссовский шум теплой Земли равен примерно 200 К, то есть температуре эталонного источника шума, поэтому шумовая температура на входе спутникового приемника составит примерно 550 К, как для ситуации, когда к антенне присоединен приемник, так и, когда к ней присоединен эталонный источник шума.

На такой основе, среднеквадратическая ошибка, выраженная либо в единицах $\{Si\}$, либо в $\{Ri\}$, в соответствии с уравнением (8), будет равна соответствующему математическому ожиданию, поделенному на $(B \xi)^{0,5}$, или $(16,5 \times 10^6 \times 25 \times 10^{-3})^{0,5}$, или 642. Среднеквадратическая ошибка квантования, выраженная либо в единицах $\{Si\}$, либо в $\{Ri\}$, в соответствии с уравнением (8), будет равна соответствующему математическому ожиданию, поделенному на $2^{(12-0,5)}$ или 2896. Среднеквадратическая ошибка – это корень квадратный из суммы квадратов двух этих значений, то есть математическое ожидание, умноженное на 0,00159. Поскольку математические ожидания $\{Si\}$ и $\{Ri\}$ равны примерно 550 К, среднеквадратическая ошибка для них при времени интегрирования 25 мс и применении 12-битового аналогово-цифрового преобразователя составит 0,87 К, 5,8% от 15 К (3%) теплового шума на входе приемника.

Эти среднеквадратические ошибки возрастают при выполнении вычислений, указанных в уравнении (7). Среднеквадратическая ошибка для $\{X_i\}$ составляет $2^{1/2}$ от ошибок для $\{S_i\}$ или $\{R_i\}$, или произведению их математических ожиданий на 0,00226. Среднеквадратические ошибки для $\{(I/N)_i, i = 4, 5, 6, 7, 8\}$ зависят от значения "i", как указано в уравнении (7). Эти значения среднеквадратических ошибок, как части математических ожиданий $\{(I/N)_i\}$, можно определить на основании следующего соотношения:

$$\begin{aligned} \text{Var} \{(I/N)_i\} &= \text{Var} (X_i) + (i-1)^2 * \text{Var} (X_2) + (i-2)^2 * \text{Var} (X_1) \\ &= \text{Var} (X_i) * \{1 + (i-1)^2 + (i-2)^2\}, \end{aligned} \quad (10)$$

поскольку изменения всех $\{X_i, i = 1 - 8\}$ равны их математическим ожиданиям, умноженным на $(0,00226)^2$, где $\text{Var} (Z)$ – это "изменение" случайной величины Z . Изменения и среднеквадратические ошибки $\{(I/N)_i\}$, основанные на выражении (10) показаны в таблице 1.

ТАБЛИЦА 1

Среднеквадратические значения оценок значений I/N в каналах 4–8

Канал	Весовой коэффициент	Изменение $(I/N)_i$	Среднеквадратическая ошибка $(I/N)_i$	Процент среднеквадратической ошибки $(I/N)_i$ (%)
4	14	0,0000715	0,008456	0,8456
5	26	0,000133	0,011524	1,1523
6	42	0,000215	0,014646	1,46647
7	62	0,000317	0,017795	1,7795
8	86	0,000439	0,020958	2,0958

Эти среднеквадратические ошибки для $\{(I/N)_i, i = 4, \dots, 8\}$ представляют собой значительные части максимальных 3% помех, указанных в Рекомендации. Однако отметим, что оценки, полученные с помощью вышеприведенных уравнений (1)–(6) дают в результате объективные оценки реальных значений $\{(I/N)_i, i = 4, \dots, 8\}$. Среднеквадратические ошибки в таблице 1 – это результат интегрирования сигналов в течение только 50 мс, удвоенного времени интегрирования, использованного при оценке в уравнении (8). Дальнейшее интегрирование на земле либо оценок $(I/N)_i$ после применения уравнений (2)–(7), либо результатов наблюдений $\{S_i\}$ и $\{R_i\}$ уменьшит среднеквадратические ошибки, указанные в таблице 1 на корень квадратный от числа отсчетов, которые использованы для усреднения. Например, если исходная последовательность оценок усредняется в течение 10 с, создавая примерно 200 отсчетов, то среднеквадратические ошибки в таблице 1 будут уменьшены в 14 раз. Результат такого усреднения на земле показан в таблице 2.

ТАБЛИЦА 2

Результат усреднения исходных оценок $(I/N)_i$ в течение 10 с

Канал	Процент среднеквадратической ошибки в $(I/N)_i$ до усреднения на земле (%)	Процент среднеквадратической ошибки в $(I/N)_i$ после усреднения на земле (%)
4	0,8456	0,060
5	1,1523	0,082
6	1,46647	0,1047
7	1,7795	0,1271
8	2,0958	0,1497

Дальнейшее усреднение на земле в течение 10 с исходных оценок $(I/N)_i$, основанных на 50-секундном усреднении на спутнике, уменьшает среднеквадратические ошибки оценок во всех каналах до уровней, который существенно меньше, чем 3% от агрегатного значения $\Delta T_{satellite}/T_{satellite}$, которое указано в п. 2 раздела *рекомендует* настоящей Рекомендации. Существует предел усреднений, которые могут быть выполнены на земле, однако поскольку в течение 10 с спутник смещается довольно заметно, то в вышеприведенном примере выполнялось усреднение именно для этого интервала. За 10 с спутник, находящейся на круговой орбите с высотой 1414 км и периодом вращения около 114 минут, сместится примерно на 72 км. Учитывая общее число помех от СБД/ЛРС, видимых со спутника, при смещении спутника на 72 км помеховая обстановка существенно не изменится, но следует проявлять осторожность при дальнейшем увеличении времени интегрирования на земле.

Приложение 3

Радиометр с встроенным направленным ответвителем для измерения суммарных шумов и помех, создаваемых приемнику космической станции фидерной линии Земля-космос ПСС спутниковой системы LEO-D в диапазоне 5 ГГц

1 Введение

В настоящем приложении описывается второй из двух вариантов внедрения радиометра, который должен использоваться на космической станции LEO-D для измерения суммарных шумов и помех в каналах с 4 по 8 включительно. Далее описывается обработка результатов этих измерений на земле для оценки отношения I/N из-за помех со стороны ЛРС.

2 Бортовой радиометр

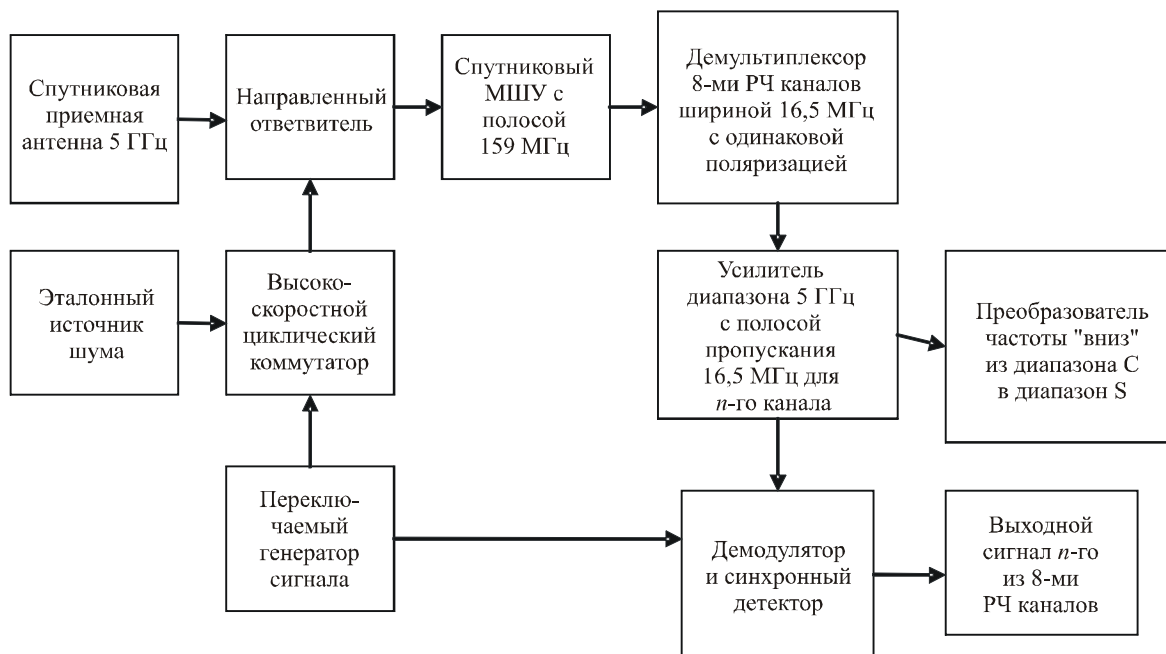
Описанный здесь радиометр аналогичен тому, что описан в Приложении 2, выше, за исключением того, что он не содержит встроенного переключателя, то есть не имеет единственного уязвимого звена в бортовом фидерном оборудовании спутника системы ФСС диапазона 5 ГГц. Вместо этого, эталонный шумовой сигнал подается в цепи приемника диапазона 5 ГГц спутника LEO-D через пассивный направленный ответвитель. Это повышает надежность фидерного оборудования системы ФСС.

Этот радиометр показан на рисунке 3. В этом случае единственным дополнением к приемнику диапазона 5 ГГц фидерной линии ФСС сети LEO-D являются:

- направленный ответвитель, расположенный непосредственно после спутниковой антенны диапазона 5 ГГц и перед приемником диапазона 5 ГГц одного из двух сигналов с круговой поляризацией;
- калибровочный источник шума с шумовой температурой 200 К, подключаемый каждые 2ξ мс на время ξ мс через направленный ответвитель к приемнику диапазона 5 ГГц и полосой пропускания 159 МГц. Сигнал от источника шума имеет эффективную шумовую температуру 200 К после прохождения через направленный ответвитель в приемник диапазона 5 ГГц;
- демодулятор и синхронный детектор каждого из восьми каналов с частотным разделением шириной 16,5 МГц в полосе приемника шириной 159 МГц. Каждые ξ мс берутся отсчеты восьми демодулированных, выпрямленных и интегрированных сигналов;
- коммутируемый генератор сигналов управляет работой и РЧ коммутатора диапазона 5 ГГц и восьми демодуляторов/интеграторов.

В результате, амплитуда шестнадцати сигналов, шириной 16,5 МГц каждый, измеряется каждые 2ξ мс и передается на наземную станцию по существующим линиям космос-Земля спутниковой сети LEO-D в диапазоне либо 7 ГГц, либо 2,5 ГГц.

РИСУНОК 3

Радиометр с калибровочным источником шума

1427-03

Описанный здесь радиометр аналогичен тому, что описан в Приложении 2, в том что касается коммутируемого генератора сигналов, восьми демодуляторов/детекторов/интеграторов и трассы для передачи каждые 2ξ мс на землю шестнадцати цифровых результатов измерений, которые одинаковы для обоих приемников. Различия между этими двумя радиометрами заключаются в методе, при помощи которого вводится эталонный источник шума: в данном случае это осуществляется при помощи встроенного направленного ответвителя, тогда, как в радиометре, описанном в Приложении 2, он вводится при помощи встроенного коммутатора, который каждые ξ мс осуществляет переключение между входным сигналом и эталонным источником.

Радиометр одновременно измеряет восемь выходных сигналов детектора $\{S_1, S_2, \dots, S_7, S_8\}$ через каждые ξ мс, в течение которых эталонный источник шума не подключается ни через коммутатор, ни через направленный ответвитель. В течение следующих ξ мс выходной сигнал эталонного источника шума добавляется к входному сигналу приемника диапазона 5 ГГц через закрытый коммутатор и направленный ответвитель. В течение этого интервала радиометр измеряет восемь выходных сигналов детектора $\{Y_1, Y_2, \dots, Y_7, Y_8\}$. Полученные 16 результатов измерений преобразуются в цифровой формат и передаются на землю для дальнейшей обработки. Этот процесс повторяется каждые 2ξ мс. Время и действие каждого компонента радиометра управляется переключающим генератором управления.

3 Обработка выходных сигналов радиометра при помощи встроенного направленного ответвителя

При помощи данного радиометра получается набор из восьми результатов одновременных измерений $\{S_1, S_2, \dots, S_7, S_8\}$, выполненных в течение тех же ξ мс, что и измерения, выполненные радиометром со встроенным коммутатором (см. Приложение 2). В течение следующих ξ мс коммутатор закрывается, и к тепловому шуму линии вверх и помехам от ЛРС добавляется калибровочный шум. В течение этого второго интервала выполняется восемь одновременных измерений $\{Y_1, Y_2, \dots, Y_7, Y_8\}$. Каждые 50 мс эти шестнадцать результатов измерений преобразуются в цифровой формат и передаются на

землю, как это делалось для результатов измерений $\{S_1, S_2, \dots, S_7, S_8\}$ и $\{R_1, R_2, \dots, R_7, R_8\}$, как описано в Приложении 2. Однако шестнадцать цифр $\{S_1, S_2, \dots, S_7, S_8\}$ и $\{Y_1, Y_2, \dots, Y_7, Y_8\}$ обрабатываются иначе.

И в этом случае время измерения для этих шестнадцати значений поддерживается достаточно малым, равным примерно 2ξ мс, так, чтобы коэффициенты усиления на спутнике существенно не менялись. Первый этап обработки результатов на земле состоит в том, чтобы определить амплитуду калибровочного сигнала в каждом из восьми каналов, при помощи простого вычисления:

$$C_i = Y_i - S_i, \quad \text{для } i = 4, 5, 6, 7 \text{ или } 8 \quad (11)$$

Эти значения $\{C_i\}$ являются уровнями калибровочного сигнала в том месте, где выполняются измерения. Можно определить уровень калибровочного сигнала C_0 в точке, где он подается на направленный ответитель (см. рисунок 3), на основании предыдущих измерений, выполненных до запуска спутника, таким образом можно определить коэффициенты усиления G_i в каждом из восьми каналов в течение периода 2ξ мс. Эти коэффициенты усиления равны:

$$G_i = C_i / C_0, \quad \text{для } i = 4, 5, 6, 7 \text{ или } 8 \quad (12)$$

Затем значения теплового шума в каналах 1 и 2 или значения "тепловой шум плюс помеха" в каналах 4, 5, 6, 7 и 8 могут быть отнесены к выходу спутниковой антенны диапазона 5 ГГц при помощи простого вычисления:

$$Q_i = S_i / G_i, \quad \text{для } i = 1, 2, 4, 5, 6, 7 \text{ и } 8 \quad (13)$$

Как и в вычислениях для радиометра, описанного в Приложении 2, уровни теплового шума $\{M_i\}$ отдельно в каналах 1 и 2 определяются значениями Q_1 и Q_2 в уравнении (13). Здесь опять предполагается, что уровни шума отдельно в каналах 4–8 равны:

$$M_i = Q_1 + (i - 1) * \Delta, \quad (14)$$

где для данного случая:

$$\Delta = Q_2 - Q_1. \quad (15)$$

Теперь суммарную помеху I_i в каналах 4–8 можно определить при помощи простого вычисления:

$$I_i = Q_i - M_i, \quad \text{для } i = 4, 5, 6, 7 \text{ и } 8 \quad (16)$$

Эти значения являются уровнями помех, указанными в п. 3 раздела *решает* Резолюции 229 (ВКР-03). Отношения помеха-шум, указанные в Рекомендации МСЭ-R S.1427, могут быть достаточно просто определены из вычислений:

$$(I/N)_i = I_i / M_i, \quad \text{для } i = 4, 5, 6, 7 \text{ и } 8 \quad (17)$$

Величина $\{(I/N)_i, i = 4, 5, 6, 7, 8\}$ может быть выражена в значениях результатов измерений $\{S_i\}$ и $\{Y_i\}$ при помощи уравнения:

$$(I/N)_i = \{(S_i/C_i) / \{(i-1)(S_2/C_2) - (i-2)(S_1/C_1)\}\} - 1, \quad (18)$$

где значения $\{C_i\}$ определяются уравнением (11) в единицах измеренных значений $\{S_i\}$ и $\{Y_i\}$. Отметим, что величина C_0 в уравнении (12) не встречается в общем уравнении (18) или в уравнении (11), что указывает на то, что оценки $\{(I/N)_i, i = 4, 5, 6, 7, 8\}$ не зависят от величины C_0 .

И в этом случае тоже эти простые вычисления в уравнениях с (11) по (18) включительно могут выполняться на земле в реальном времени при помощи быстродействующего компьютера, находящегося в той точке, где принимается сигнал линии вниз диапазона 2,5 ГГц или 7 ГГц. Или же результаты измерений могут сохраняться для последующего усреднения и, возможно, для последующей обработки. Преимущества сохранения результатов измерений заключается в том, что впоследствии могут быть выполнены сравнительные вычисления для повторных измерений.

Интервалы наблюдения ξ мс слишком коротки, для того чтобы получить выигрыш в отношении сигнал-помеха при обработке сигналов $(B\tau)^{0,5}$ достаточный для получения точных оценок отношения помеха-шум, определяемых уравнением (17) или уравнением (18). Однако значения, полученные в ходе реализации вышеописанного алгоритма, являются точными оценками требуемых величин, поэтому для получения достаточно больших значений $(B\tau)^{0,5}$ может быть выполнено дальнейшее усреднение на земле, что позволит получить оценки с достаточно малыми случайными составляющими. И снова единственным ограничением в этом интегрировании является то, что измеряемые параметры будут меняться с движением спутника по его траектории, и поэтому будут меняться и шум, поступающий с земли, и суммарная помеха от ЛРС.

4 Ошибка в измерениях $\{S_i\}$ и $\{Y_i\}$

После определения среднеквадратической ошибки оценок выполняется процедура, которая очень похожа на ту, что описана в п. 4 Приложения 2. Вследствие этого здесь не будут повторяться подробности, которые являются общими для обоих аналитических расчетов. Отметим, что:

- данный способ измерения дает в результате точные оценки величин $\{S_i\}$, $\{Y_i\}$ и $\{(I/N)_i\}$, поэтому усреднение уменьшает любые случайные или систематические ошибки в $\{(I/N)_i\}$;
- значения шумовой температуры в $\{S_i\}$ составляют примерно 550 К, но, когда к входному сигналу приемника добавляется эталонный источник шума, значения шумовой температуры в $\{Y_i\}$ составляют примерно 750 К. Этот факт учитывается при определении ошибок для значений $\{(I/N)_i\}$ в уравнении (11), но его необходимо учесть здесь при определении среднеквадратических ошибок для $\{(I/N)_i\}$.

Как и в п. 4 Приложения 2, определение среднеквадратических ошибок в единицах $\{(I/N)_i\}$ выполняется для случая, когда время интегрирования ξ на спутнике равно 25 мс, и количество битов η в выходном сигнале аналогово-цифрового преобразователя равно 12. Среднеквадратические ошибки из-за детектирования и интегрирования случайных переменных $\{S_i\}$ и $\{Y_i\}$ даны в вышеприведенном уравнении (8), а среднеквадратические ошибки из-за квантования определяются уравнением (9).

Как и в ходе получения среднеквадратической ошибки в единицах $\{S_i\}$ или $\{R_i\}$ в Приложении 2, среднеквадратические ошибки для $\{S_i\}$ и $\{Y_i\}$ определяются уравнениями (8) и (9). Среднеквадратические ошибки из-за детектирования и интегрирования – это математические ожидания соответствующих величин, поделенные на $(B\xi)^{0,5}$, или $(16,5 \times 10^6 \times 25 \times 10^{-3})^{0,5}$, или 642. Среднеквадратическая ошибка квантования либо для $\{S_i\}$, либо для $\{Y_i\}$ – это математическое ожидание соответствующей величины, поделенное на $2^{(12-0,5)}$, или 2896. Среднеквадратическая ошибка либо для $\{S_i\}$, либо для $\{Y_i\}$ – это корень суммы квадратов этих двух величин, т. е. математические ожидания, умноженные на 0,00159. Математические ожидания для $\{S_i\}$ составляют примерно 550 К, поэтому среднеквадратическая ошибка для этих величин при времени интегрирования 25 мс и 12-битовом выходном сигнале аналогово-цифрового преобразователя составит 0,87 К. Математические ожидания величин $\{Y_i\}$ составляют примерно 750 К, поэтому среднеквадратическая ошибка для них будет равна 1,19 К.

Среднеквадратические ошибки значений $\{C_i\}$ равны корню суммы квадратов среднеквадратических ошибок соответствующих значений S_i и Y_i , как указано в уравнении (11). Эти среднеквадратические ошибки для $\{C_i\}$ после интегрирования и квантования на спутнике равны 1,474 К или 0,00737 от их математического ожидания, которое равно примерно 200 К. Среднеквадратические ошибки величин $\{S_i/C_i\}$ или $\{1/\{(Y_i/S_i)-1\}\}^{-1}$ в уравнении (18) равны также 0,00737 от их математических ожиданий.

Среднеквадратические ошибки для $\{(I/N)_i, i = 4, 5, 6, 7, 8\}$ зависят от значения "i", как указано в уравнении (18). Эти значения среднеквадратических ошибок, как долей от математических ожиданий величин $\{(I/N)_i\}$, могут быть определены на основании соотношения:

$$\begin{aligned} \text{Var } \{(I/N)_i\} &= \text{Var } (Z_i) + (i-1)^2 * \text{Var } (Z_2) + (i-2)^2 * \text{Var } (Z_1) \\ &= \text{Var } (Z_i) * \{1 + (i-1)^2 + (i-2)^2\}, \end{aligned} \quad (19)$$

где Z_i , по определению, должно быть идентично (S_i/C_i) в уравнении (18). (Значения Z_1 и Z_2 представляют собой Z_i , у которого i равно 1 и 2, соответственно.) Обратите внимание, что уравнение (19) имеет тот же вид, что и (10), хотя значения среднеквадратических ошибок 0,00737 для $\{Z_i\}$ в уравнении (19) несколько больше, чем значения среднеквадратических ошибок 0,00226 для $\{X_i\}$ в уравнении (10). Это увеличение объясняется тем, что в такой конструкции радиометра шум от эталонного источника шума добавляется к шуму входной антенны радиометра, описанного в Приложении 2, а не заменяет его, и для такой реализации радиометра необходимы соответствующие вычисления.

Как показано в Приложении 2, изменение значений $(I/N)_i$ является функцией номера канала i , результатом оценки N_i , выполненной в уравнениях (14) и (15).

ТАБЛИЦА 3

Среднеквадратические значения оценок значений I/N в каналах 4–8

Канал	Весовой коэффициент	Изменение $(I/N)_i$	Среднеквадратическая ошибка $(I/N)_i$	Процент среднеквадратической ошибки $(I/N)_i$ (%)
4	14	0,00076	0,02758	2,75
5	26	0,00141	0,03758	3,75
6	42	0,00228	0,04776	4,78
7	62	0,00337	0,05803	5,80
8	86	0,00467	0,06835	6,83

Эти среднеквадратические ошибки для оценок величин $\{(I/N)_i, i = 4, \dots, 8\}$, полученные с использованием радиометра, описанного в настоящем Приложении, имеют тот же порядок, что и пределе 3% для I/N , поэтому требуется дальнейшее усреднение на земле. Как показано в п. 4 Приложения 2, усреднение результатов на земле уменьшает среднеквадратическую ошибку на корень квадратный числа усредняемых отсчетов. Если исходная последовательность оценок усредняется в течение 10 с, как показано в Приложении 2, создавая примерно 200 отсчетов, то среднеквадратические ошибки в таблице 3 будут уменьшены в 14 раз. Результат такого усреднения на земле показан в таблице 4. Усреднение в течение 30 с с использованием 600 отсчетов уменьшит среднеквадратическую ошибку в 25 раз, что также показано в таблице 4.

ТАБЛИЦА 4

Результат усреднения исходных оценок $(I/N)_i$ в течение 10 с и в течение 30 с

Канал	Процент среднеквадратической ошибки в $(I/N)_i$ до усреднения на земле (%)	Процент среднеквадратической ошибки в $(I/N)_i$ после усреднения на земле в течение 10 с (%)	Процент среднеквадратической ошибки в $(I/N)_i$ после усреднения на земле в течение 30 с (%)
4	2,75	0,197	0,110
5	3,75	0,268	0,150
6	4,78	0,341	0,191
7	5,80	0,414	0,232
8	6,83	0,488	0,273

Как показано в таблице 4, среднеквадратические ошибки для неискаженных измерений значений $\{(I/N)_i, i = 4, \dots, 8\}$ могут быть существенно уменьшены за счет усреднения на земле исходных результатов измерений, которые основаны на усреднении результатов измерений на спутнике в течение 25 мс. Отметим, что за 10 с спутник сместится на 72 км, а за 30 с он пролетит 216 км;

существует предел степени, до которой можно усреднять результаты измерения во времени, поскольку реальные помехи, испытываемые спутником, будут меняться при существенном перемещении спутника. Учитывая, что антенны LEO-D является всенаправленной, усреднение на земле в течение 30 с является приемлемым, что дает результаты со среднеквадратическими ошибками, которые существенно меньше, чем величина 3% от агрегатного значения $\Delta T_{satellite}/T_{satellite}$, которая указана в п. 2 раздела *рекомендует* настоящей Рекомендации.
