

МСЭ-R

Сектор радиосвязи МСЭ

Рекомендация МСЭ-R S.2029
(12/2012)

**Статистический метод оценки
изменяющихся во времени помех
геостационарным сетям фиксированной
спутниковой службы, создаваемых
сетью земных станций, работающих
с использованием схем MF-TDMA,
в составе геостационарной сети
фиксированной спутниковой службы**

Серия S
Фиксированная спутниковая служба



Предисловие

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

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

Политика в области прав интеллектуальной собственности (ПИС)

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

Серии Рекомендаций МСЭ-R

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

Серия	Название
BO	Спутниковое радиовещание
BR	Запись для производства, архивирования и воспроизведения; пленки для телевидения
BS	Радиовещательная служба (звуковая)
BT	Радиовещательная служба (телевизионная)
F	Фиксированная служба
M	Подвижная спутниковая служба, спутниковая служба радиоопределения, любительская спутниковая служба и относящиеся к ним спутниковые службы
P	Распространение радиоволн
RA	Радиоастрономия
RS	Системы дистанционного зондирования
S	Фиксированная спутниковая служба
SA	Космические применения и метеорология
SF	Совместное использование частот и координация между системами фиксированной спутниковой службы и фиксированной службы
SM	Управление использованием спектра
SNG	Спутниковый сбор новостей
TF	Передача сигналов времени и эталонных частот
V	Словарь и связанные с ним вопросы

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

Электронная публикация
Женева, 2014 г.

© ITU 2014

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

РЕКОМЕНДАЦИЯ МСЭ-R S.2029

Статистический метод оценки изменяющихся во времени помех геостационарным сетям фиксированной спутниковой службы, создаваемых сетью земных станций, работающих с использованием схем MF-TDMA, в составе геостационарной сети фиксированной спутниковой службы

(Вопрос МСЭ-R 208/4)

(2012)

Сфера применения

В настоящей Рекомендации представлен статистический метод оценки изменяющихся во времени помех, создаваемых сетью земных станций, работающих с использованием схем MF-TDMA, в составе сети фиксированной спутниковой службы на геостационарной орбите. Данная методика рассматривает потенциальные помехи другой сети ГСО ФСС. Кроме того, этот метод может использоваться для регулирования уровней мощности терминалов, создающих помехи, таким образом, чтобы показатели качества спутниковой сети, подвергающейся воздействию помех, не затрагивались.

Ассамблея радиосвязи МСЭ,

учитывая,

- a)* что спутники ГСО ФСС хорошо подходят для реализации прикладных задач широкополосной связи, включая интернет и услуги передачи данных;
- b)* что спутниковые сети используют разнообразные сетевые топологии и схемы многостанционного доступа, в том числе схему многочастотного многостанционного доступа с временным разделением (MF-TDMA);
- c)* что путем применения эффективных схем модуляции и кодирования, более высоких уровней э.и.и.м. спутников и других методов некоторые сети способны поддерживать возможность полноячейстных (точка с точкой) соединений с терминалами, обладающими малой апертурой;
- d)* что необходимо обеспечивать защиту сетей ФСС от любых потенциальных помех, создаваемых этими терминалами;
- e)* что было бы целесообразно иметь методики оценки изменяющихся во времени помех, создаваемых одной из сетей ГСО ФСС другой сети ГСО ФСС;
- f)* что было бы целесообразно иметь методики оценки уровней помех спутниковым сетям, создаваемых земными станциями, работающими по схемам MF-TDMA;
- g)* что многие технические характеристики этих сетей, влияющие на эксплуатационные показатели и использование спектра/орбиты, являются переменными во времени величинами, которые целесообразнее всего моделировать при помощи стохастических процессов,

отмечая,

- a)* что максимальные допустимые уровни межсетевых помех, создаваемых сетями ГСО сетям ГСО/ФСС, работающим в той же полосе частот, приведены в Рекомендации МСЭ-R S.1323;
- b)* что максимальные допустимые уровни межсетевых помех и методика определения этих помех, создаваемых системами, не относящимися к ГСО, сетям ГСО/ФСС, работающим в той же полосе частот, приведены в Рекомендации МСЭ-R S.1323;
- c)* что оценка неизменных во времени помех, как правило, производится при помощи метода $\Delta T/T$, описанного в Рекомендации МСЭ-R S.738;

d) что методики оценки уровней плотности внеосевой э.и.и.м. и определения изменяющихся во времени помех в направлении соседних спутников, которые возникают в результате ошибок наведения земных станций, установленных на транспортных средствах, приведены в Рекомендации МСЭ-R S.1857,

рекомендует,

1 чтобы методика, приведенная в Приложении, использовалась для оценки изменяющихся во времени помех, обусловленных многочисленными земными станциями, работающими по схеме MF-TDMA;

2 чтобы представленная методика использовалась для определения уровней внеосевого излучения мешающих земных станций, причем эти уровни должны соответствовать показателям качества спутниковой сети, подвергающейся воздействию помех;

3 чтобы представленная методика использовалась таким образом, чтобы сети типа MF-TDMA, описанные в настоящей Рекомендации, не создавали помех другим сетям ФСС, работающим в тех же полосах частот за пределами уровня, принятого администрациями;

4 чтобы следующие примечания рассматривались как часть настоящей Рекомендации.

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Методика, приведенная в Приложении, обеспечивает статистический подход к оценке потенциального воздействия помех сети MF-TDMA на соседнюю сеть ГСО ФСС, работающую на той же частоте.

ПРИМЕЧАНИЕ 2. – Параметры и примеры, приведенные в Приложении, относятся к гипотетической системе, работающей в диапазоне частот 20/30 ГГц. Однако эта методика может использоваться также для других диапазонов частот после соответствующей модификации ряда параметров.

ПРИМЕЧАНИЕ 3. – Методика, приведенная в настоящей Рекомендации, неприменима к сетям, работающим по схемам многостанционного доступа с кодовым разделением (CDMA).

ПРИМЕЧАНИЕ 4. – Для того чтобы удостовериться, что математическая модель, описанная в данной методике, корректно представляет изменяющиеся во времени характеристики сети MF-TDMA, может оказаться целесообразным получить статистические характеристики действующих сетей.

ПРИМЕЧАНИЕ 5. – Пропорциональное распределение кратковременной помехи для сетей ГСО/ФСС, работающих по схеме MF-TDMA и рассматриваемых в настоящей Рекомендации, может быть взаимно согласовано при помощи процедуры координации.

ПРИМЕЧАНИЕ 6. – Допуск по времени и критерии кратковременной помехи для сетей ГСО/ФСС могут являться предметом дальнейшего изучения.

Приложение

Статистический метод оценки изменяющихся во времени помех геостационарным сетям фиксированной спутниковой службы, создаваемых сетью земных станций, работающих с использованием схем MF-TDMA, в составе геостационарной сети фиксированной спутниковой службы

1 Введение

В последние годы значительно увеличился спрос на услуги двустороннего спутникового интернета. Эти услуги, в частности, для домашних пользователей и малого бизнеса предоставляются при помощи спутниковых терминалов с малой апертурой. В стандартном варианте сеть одного спутника может состоять из большого количества терминалов с малой апертурой, развернутых на большой территории. В зависимости от месторасположения внутри зоны обслуживания спутника, изменяющихся погодных условий и скоростей передачи данных на стороне пользователя эти терминалы могут работать в определенном диапазоне размеров апертур, и для них могут требоваться различные уровни мощности передачи сигналов. В целях эффективного использования сетевых ресурсов в этих сетях могут

применяться методы многостанционного доступа с временным и частотным разделением. Характерной особенностью терминалов с малой апертурой является то, что они имеют большую ширину диаграммы направленности антенны и, следовательно, могут создавать помехи на линиях вверх в направлении соседних спутников, если уровни мощности передачи сигнала не отрегулированы должным образом. Кроме того, некоторые из малых терминалов, установленных на воздушных и морских судах, в поездах или наземных транспортных средствах, а также стационарные терминалы могут вызывать ошибки наведения антенн, в свою очередь приводящие к потенциальным помехам, которые необходимо уменьшать. В совокупности данные эффекты вносят свой вклад в картину изменяющихся во времени помех, создаваемых сетью терминалов приемнику, относящемуся к другой спутниковой сети.

В настоящем Приложении представлен статистический подход к определению помех в направлении сети ГСО, создаваемых другими сетями ГСО, состоящими из множества терминалов, работающих с применением схемы многостанционного доступа с временным разделением, а также ошибок наведения антенны. В Приложении рассматривается критерий долговременной помехи и критерии соответствия кратковременным показателям качества, приведен ряд примеров, иллюстрирующих воздействие на соседнюю спутниковую сеть, а также представлен пошаговый метод вычисления результирующей помехи. Представленная методика может оказаться целесообразной для определения уровней внеосевого излучения мешающих терминалов так, чтобы они соответствовали кратковременным и долговременным показателям качества спутниковой системы, подвергающейся воздействию помех.

2 Долговременные и кратковременные компоненты помех

Сигнал помехи в приемнике, подвергающемся мешающему воздействию, состоит из сигналов, которые передаются большим количеством терминалов единственной сети, создающей помехи и работающей с использованием протокола многостанционного доступа с временным разделением. В этих терминалах могут использоваться различные размеры апертуры антенн, а сигналы могут передаваться с различными уровнями мощности в зависимости от месторасположения терминала в пределах зоны охвата спутникового луча. Кроме того, эти терминалы могут иметь небольшие ошибки наведения антенн. Таким образом, если интервал наблюдений достаточно велик, чтобы охватить передачи от нескольких терминалов, создающих помехи, уровень помех в приемнике, подвергающемся мешающему воздействию, изменяется во времени.

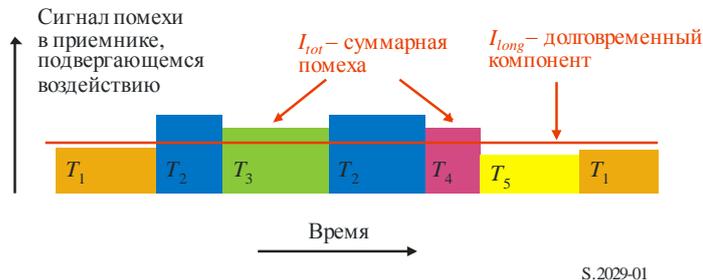
В подобных случаях для наглядности сигнал помехи в приемнике, подвергающемся мешающему воздействию, I_{tot} , может быть выражен как сумма долговременного, I_{long} , и кратковременного, I_{short} , компонентов помехи таким образом, что $I_{tot} = I_{long} + I_{short}$. Долговременный компонент помехи остается неизменным в течение коротких интервалов времени, однако может демонстрировать небольшие отклонения, если наблюдение занимает длительные интервалы времени (порядка нескольких минут). Эти отклонения, по сути, являются статистическими и обусловлены медленно изменяющимися характеристиками передаваемых сигналов. С другой стороны, кратковременный компонент помехи обусловлен передачами от терминалов различных типов и может изменяться в течение очень коротких интервалов времени, составляющих доли секунды. Следует отметить, что кратковременные и долговременные компоненты помех используются только для наглядности; анализу подвергается суммарная помеха.

На рисунке 1 показаны уровни помех в приемнике, подвергающемся мешающему воздействию, обусловленных передачей сигналов от терминалов T_1 , T_2 , T_3 , T_4 и T_5 . В целом, как показано на этом рисунке, уровни помех и продолжительность передачи зависят от конкретного терминала. Приведенный здесь долговременный компонент представляет средний уровень помехи, а кратковременный компонент помехи определяется разностью между суммарной помехой и долговременным компонентом.

В целях количественного определения и ограничения влияния помех в настоящем Приложении приведены методы оценки и ограничения долговременной помехи, кратковременной помехи и суммарной помехи. В частности, приведены критерий долговременной помехи и критерии соответствия кратковременным показателям качества в целях ограничения влияния помех на приемник, подвергающийся мешающему воздействию.

РИСУНОК 1

Помехи, наблюдаемые в приемнике, подвергающемся мешающему воздействию, обусловленные передачами сигналов многостанционного доступа с временным разделением от терминалов T_1 , T_2 , T_3 , T_4 и T_5



S.2029-01

3 Критерий долговременной помехи

Оценка неизменной во времени помехи, как правило, производится при помощи метода $\Delta T/T$, например как описывается в Рекомендации МСЭ-R S.738. Для того чтобы использовать аналогичный подход, рассмотрим гипотетическую ситуацию, при которой уровень помех в приемнике, испытывающем мешающее воздействие, не меняется во времени: это означает, что уровни плотности э.и.и.м. в терминалах устанавливаются таким образом, что уровень помех, наблюдаемый в приемнике, подвергающемся мешающему воздействию, задается уровнем долговременной помехи, I_{long} . Кроме того, в данном случае терминалы не создают ошибок наведения антенн. При этом критерий долговременной помехи выражается в виде коэффициента $\Delta T/T$ следующим образом:

$$\left(\frac{\Delta T}{T} \right)_{long} = \frac{\tilde{I}_{long} / k}{\Theta_v + \gamma_v \Theta_v^s}, \quad (1)$$

где \tilde{I}_{long} определяется как усредненная по множеству спектральная плотность мощности помехи, вычисленная в полосе пропускания, W_{long} , k – постоянная Больцмана, Θ_v – шумовая температура приемника, подвергающегося воздействию помех, приведенная к выходу его антенны, Θ_v^s – шумовая температура в приемнике спутника, подвергающегося воздействию помех, приведенная к выходу его антенны, а γ_v – коэффициент усиления при передаче сигнала от выхода входной антенны спутника, подвергающегося воздействию помех, к выходу антенны приемника, подвергающегося воздействию помех.

Очевидно, что при постоянной усредненной по множеству мощности помехи отношение "мощность/шум" помехи, рассматриваемое в данном гипотетическом случае, не изменяется во времени.

Однако на практике скорее применяется усредненное по времени значение долговременного компонента помехи, нежели усредненное по множеству. Усредненное по времени значение может демонстрировать небольшие отклонения, если оно рассчитывается в течение различных интервалов времени. Это усредненное по времени значение, \tilde{I}_{long} , рассчитанное в течение длительного интервала времени, T_{long} , может демонстрировать отклонения, так как соответствующая помеха представляет собой статистический процесс. Кроме того, статистические характеристики терминалов могут изменяться в течение данного интервала, что приводит к небольшим отклонениям от этого среднего значения. Для таких отклонений могут задаваться пределы путем наложения ограничений на интегральную функцию распределения (CDF) переменной $\left(\Delta T / T \right)_{long}$ следующим образом:

$$\Pr \left\{ \left(\frac{\Delta T}{T} \right)_{long} > X \% \right\} < p_{long} \% , \quad (2)$$

где X , p_{long} и T_{long} – системные параметры.

Для большей наглядности в Рекомендации МСЭ-R S.523-4 определяются интервалы усреднения, равные 10 мин, при вычислении помех для телефонных систем с РСМ-кодированием. Кроме того, в Приложении 1 Рекомендации МСЭ-R S.1432-1 определяются максимальные уровни отношения помеха/шум (I/N), которые могут превышать в течение любого месяца: (I/N) > 0 дБ для 0,005% времени любого месяца; (I/N) > -2,4 дБ для 0,03% времени любого месяца; (I/N) > -10 дБ для 20% времени любого месяца; и (I/N) > -12 дБ для 100% времени любого месяца.

4 Критерии соответствия кратковременным показателям качества

В предыдущем разделе были установлены предельные значения для долговременных помех. В данном разделе представлен критерий для ограничения суммарной помехи таким образом, чтобы она соответствовала кратковременным показателям качества приемника, подвергающегося воздействию помех. Суммарная помеха может демонстрировать отклонения в течение нескольких миллисекунд. Согласно Рекомендации МСЭ-R S.1323-2 линии связи, подвергающиеся воздействию помех, должны обладать энергетическим запасом, достаточным для преодоления ухудшений, связанных с совокупным воздействием эффектов распространения и изменяющихся во времени помех. Ухудшения, обусловленные эффектами распространения, не должны составлять более чем 90% времени, заложенного в кратковременных показателях качества. Кроме того, в этой Рекомендации утверждается, что изменяющиеся во времени помехи "не должны являться причиной для более чем 10% допуска по времени для коэффициента ошибок по битам, BER, (или значения сигнал/шум, C/N) определенных в кратковременных показателях качества планируемой сети и соответствующих наименьшей процентной доле времени (самое низкое значение C/N)". В настоящем Приложении представлен критерий, аналогичный приведенному выше и позволяющий получить допустимый предельный уровень для кратковременной помехи.

Кратковременные показатели качества, как правило, выражаются относительно уровней коэффициента ошибок по битам (BER) или уровней отношения несущая/шум (C/N), которые могут не ухудшаться в течение заданного периода времени. Например, для заданного отношения C/N и заданных пар процентных отношений времени, $((C/N)_j, p_j\%)$, $j = 1, 2, \dots, J$ отношение C/N может составлять менее $(C/N)_j$ только для $p_j\%$ времени любого месяца. Аналогично подпункту о) раздела "учитывая" Рекомендации МСЭ-R S.1323-2 рассмотрим эффекты распространения, приводящие к ухудшению характеристик линии не более чем в $(1 - p_{short}/100) \times p_j\%$, $j = 1, 2, \dots, J$, времени любого месяца, где p_{short} представляет часть допуска по времени, определенную в кратковременных показателях качества, заданных для кратковременных помех (например, $p_{short} = 10$). Отмечая, что долговременные помехи ограничиваются, как это предложено в предыдущем разделе, предлагаемые критерии, касающиеся ограничения кратковременных помех и соответствия кратковременным показателям качества, выражаются следующим образом.

- a) При наличии эффектов распространения и долговременных помех отношение C/N не должно составлять менее чем $(C/N)_j$ для более чем $(1 - p_{short}/100) \times p_j\%$, $j = 1, 2, \dots, J$, (к примеру, $p_{short} = 10$) времени любого месяца.
- b) При наличии кратковременных помех отношение C/N не должно составлять менее чем $(C/N)_j$ для более чем $(p_{short}/100) \times p_j\%$ времени любого месяца, где j соответствует наименьшему значению $(C/N)_j$.
- c) При наличии эффектов распространения и суммарной помехи отношение C/N не должно составлять менее чем $(C/N)_j$ для более чем $p_j\%$, $j = 1, 2, \dots, J$ времени любого месяца.

Следует отметить, что для соблюдения вышеуказанных условий линия, подвергающаяся воздействию помех, должна обладать достаточным энергетическим запасом, позволяющим соблюдать условие а), а уровень плотности э.и.и.м. передатчика, создающего помехи, должен быть ограничен в целях соблюдения условий б) и с). Необходимо также отметить, что согласно условию с) совокупное влияние ухудшения распространения и суммарной помехи таково, что отношение C/N по-прежнему соответствует кратковременным показателям качества.

4.1 Выражение отношений C/N

Отношение C/N в условиях ясного неба с учетом долговременного компонента помех может выражаться как

$$(C/N)_{CS} = \frac{C_{CS}}{N_{CS} + I_{long}},$$

где C_{CS} – мощность несущей в условиях ясного неба, N_{CS} – мощность шума в приемнике, подвергнутому воздействию помех, в условиях ясного неба, а I_{long} – долговременный компонент помехи в условиях ясного неба.

Далее рассмотрим отношение C/N в условиях замирания вследствие дождя. Коэффициенты затухания вследствие дождя в направлениях вверх и вниз на линии передачи сигнала, подвергнутой воздействию помех, обозначаются как A_{\uparrow} и A_{\downarrow} соответственно. Мощность несущей в приемнике, подвергнутой воздействию помех, при этих условиях снижается на коэффициент $F(A_{\uparrow}, A_{\downarrow})$ и обозначается как $C_{CS}F(A_{\uparrow}, A_{\downarrow})$. Мощность шума в приемнике обозначается функцией $N(N_{CS}, A_{\downarrow})$. Данная функция включает шум неба в условиях дождя и компоненты шума от полезных и соседних спутников. Следует отметить, что коэффициенты затухания вследствие дождя, на линии вниз от соседних спутников могут отличаться от A_{\downarrow} . В подобных случаях данная шумовая функция должна учитывать эту разницу в коэффициентах затухания вследствие дождя. В условиях замирания вследствие дождя долговременный компонент помехи обозначается как $I(I_{long}, A_{\downarrow}, A_{\uparrow, i})$, где $A_{\uparrow, i}$ – коэффициент затухания вследствие дождя на линии вверх от терминала, создающего помехи, к полезному спутнику. Следует отметить, что в случаях, когда коэффициенты затухания вследствие дождя на линии вверх для различных терминалов, создающих помехи, неодинаковы, то в данном выражении должны учитываться различные коэффициенты затухания вследствие дождя. Более того, если компоненты затухания вследствие дождя на линии вниз от соседних и полезных спутников неодинаковы, то должны учитываться различные коэффициенты затухания вследствие дождя на линии вниз от соседних спутников. С учетом комбинации этих данных отношение C/N в условиях замирания вследствие дождя и наличия долговременного компонента помехи выражается как

$$(C/N)_s = \frac{C_{CS}F(A_{\uparrow}, A_{\downarrow})}{N(N_{CS}, A_{\downarrow}) + I(I_{long}, A_{\downarrow}, A_{\uparrow, i})}. \quad (3)$$

И наконец, рассмотрим затухание вследствие дождя в присутствии суммарной помехи, I_{tot} . Коэффициент C/N может быть выражен как

$$(C/N)_t = \frac{C_{CS}F(A_{\uparrow}, A_{\downarrow})}{N(N_{CS}, A_{\downarrow}) + I(I_{tot}, A_{\downarrow}, A_{\uparrow, i})}, \quad (4)$$

где $I(I_{tot}, A_{\downarrow}, A_{\uparrow, i})$ – это суммарная помеха в условиях дождя.

4.2 Выражение критерия кратковременных показателей качества

В настоящем подразделе критерии соответствия кратковременным показателям качества, заданным в п. 4, выражены с точки зрения снижения отношения C/N . Приведенный выше критерий а) может быть выражен как

$$\Pr\{(C/N)_s < (C/N)_j\} \leq (1 - p_{short}/100) \times p_j \%, \quad j = 1, 2, \dots, J.$$

В целях анализа целесообразно учитывать снижение коэффициента C/N по сравнению с его значениями для ясного неба. Обозначим такое ухудшение характеристик в присутствии долговременного компонента помехи и суммарной помехи как $Z_s = \frac{(C/N)_{CS}}{(C/N)_s}$ и $Z_t = \frac{(C/N)_{CS}}{(C/N)_t}$ соответственно. Кроме того, определим переменные $Z_j = \frac{(C/N)_{CS}}{(C/N)_j}$, $j = 1, 2, \dots, J$. Тогда вышеприведенная формула может быть выражена в следующем эквивалентном виде:

$$\Pr\{Z_s > Z_j\} \leq (1 - p_{short}/100) \times p_j \%, \quad j = 1, 2, \dots, J. \quad (5)$$

Аналогичным образом критерий с) может быть выражен как

$$\Pr\{Z_t > Z_j\} \leq p_j \%, \quad j = 1, 2, \dots, J. \quad (6)$$

И, наконец, критерий b) может быть соблюден в том случае, если линия, подвергающаяся воздействию помех, спроектирована так, чтобы эффекты распространения использовали максимальное выделенное время для наименьшего заданного уровня коэффициента C/N , который обозначается как $(C/N)_{jm}$. Следовательно, критерий b) может быть выражен как

$$\Pr\{Z_s > Z_{jm}\} = (1 - p_{short}/100) \times p_{jm} \%. \quad (7)$$

5 Список параметров и условных обозначений

Этот раздел содержит список параметров и условных обозначений, используемых в настоящем Приложении.

λ_u, λ_d (м)	– значения длин волн в направлениях вверх и вниз соответственно.
Φ_r (градусы)	– ошибка наведения антенны на T_r : угол между фактическим и требуемым направлениями линии прицеливания антенны.
$\Phi_{r,\varepsilon}, \Phi_{r,a}$ (градусы)	– ошибка наведения антенны в направлениях угла места и азимута на T_r : разница между фактическим и требуемым значениями угла места и азимута.
ψ (градусы)	– внеосевой угол на T_i , измеренный от направления прицеливания.
$\Psi_{r,x}, x = i, v$ (градусы)	– угол на T_r между направлением прицеливания и направлением на S_x .
$\Psi_{v,i}$ (градусы)	– угол на R_v между направлением прицеливания и направлением на S_i .
$\delta_{v,x}, x = i, v$ (градусы)	– угол на приемной антенне S_v между ее направлением прицеливания и направлением на T_x .
$\delta_{i,r}$ (градусы)	– угол на приемной антенне S_i между ее направлением прицеливания и направлением на T_r .
$\eta_x, x = i, v$ (градусы)	– угол на передающей антенне S_x между ее направлением прицеливания и направлением на R_v .
$\gamma_x, x = i, v$	– усиление передачи спутниковой линии вниз, измеренное от выхода приемной антенны S_x до выхода приемной антенны R_v .
θ_{space} (градусы)	– орбитальное расстояние между спутниками S_v и S_i .
Θ_r (К)	– шумовая температура неба вследствие дождя на R_v , относящаяся к выходу его приемной антенны.
Θ_v (К)	– шумовая температура системы на R_v , относящаяся к выходу его приемной антенны.
$\Theta_x^s, x = i, v$ (К)	– шумовая температура системы на S_x , относящаяся к выходу его приемной антенны.
A_{\downarrow}	– коэффициент затухания вследствие дождя на линии вниз от S_v до R_v .
A_{\uparrow}	– коэффициент затухания вследствие дождя на линии вверх от T_v до S_v .
$A_{\uparrow,i}$	– коэффициент затухания вследствие дождя на линии вверх от T_r до S_v .
$B_x, x = r, v$ (Вт/Гц)	– плотность э.и.и.м. по линии прицеливания на T_x .
$B_x^s, x = r, v$ (Вт/Гц)	– плотность э.и.и.м. по линии прицеливания на S_x .
C (Вт/Гц)	– спектральная плотность мощности несущей в условиях ясного неба на выходе приемной антенны R_v .

C_{CS} (Вт)	– мощность несущей в условиях ясного неба на выходе приемной антенны R_v .
C_i, C_v	– центры принимаемых лучей от спутников S_i и S_v на поверхности Земли.
$(C/N)_j$	– отношение (C/N) , определенное в кратковременных показателях. Отношение C/N не должно быть меньше, чем определено для $p_j\%$ времени.
$(C/N)_{CS}$	– отношение (C/N) в приемнике, подвергающемся воздействию помех, в условиях ясного неба и в присутствии долговременной помехи.
$(C/N)_S$	– отношение (C/N) в приемнике, подвергающемся воздействию помех, в условиях замирания вследствие дождя и в присутствии долговременной помехи.
$(C/N)_t$	– отношение (C/N) в приемнике, подвергающемся воздействию помех, в условиях замирания вследствие дождя и в присутствии суммарной помехи.
E (Вт/Гц)	– диаграмма направленности внеосевой плотности э.и.м. на T_r .
ЭИИМ(ψ) (Вт/Гц)	– плотность э.и.м. во внеосевом направлении ψ .
$G_{t,r}$	– приведенный коэффициент усиления передающей антенны на T_r . ($G_{t,r}(0) = 1$).
$G_{r,v}$	– коэффициент усиления приемной антенны на R_v .
$G_{r,i}^S, G_{r,v}^S$	– диаграммы усиления приемных антенн на S_i и S_v соответственно.
$G_{t,i}^S, G_{t,v}^S$	– приведенный коэффициент усиления передающей антенны на S_i и S_v соответственно: $(G_{t,i}^S(0) = G_{t,v}^S(0) = 1).$
\tilde{I}_{avg} (Вт/Гц)	– усредненное по множеству значение спектральной плотности мощности помех на R_v , обусловленное всеми терминалами T_v .
I_{long} (Вт)	– мощность долговременных помех на R_v , обусловленная всеми терминалами T_v .
\tilde{I}_{long} (Вт/Гц)	– спектральная плотность мощности долговременных помех на R_v , обусловленная всеми терминалами T_v .
I_{tot} (Вт)	– мощность суммарных помех на R_v , обусловленная всеми терминалами T_v .
\tilde{I}_{tot} (Вт/Гц)	– спектральная плотность мощности суммарных помех на R_v , обусловленная всеми терминалами T_v .
$\tilde{I}_{tot,0}$ (Вт/Гц)	– спектральная плотность мощности суммарных помех в отсутствие ошибок наведения антенны на R_v , обусловленная всеми терминалами T_v .
$I_x(r), x = i, v$ (Вт/Гц)	– спектральная плотность мощности помех на R_v , обусловленная T_r и принимаемая при посредстве S_x .
k	– постоянная Больцмана. $k = 1,38065 \times 10^{-23}$ Вт/К/Гц.
L_d	– потери на трассе вниз от S_i или S_v до R_v . $L_d = (4\pi d_d/\lambda_d)^2$ + прочие потери, где d_d – протяженность линии вниз.
$L_{u,x}, x = r, v$	– потери на трассе вверх от T_x до S_v . $L_{u,x} = (4\pi d_{u,x}/\lambda_u)^2$ + прочие потери, где $d_{u,x}$ – протяженность линии вверх.
N_{\uparrow} (Вт/Гц)	– спектральная плотность мощности шума на S_v на выходе приемной антенны R_v .
N_{\downarrow} (Вт/Гц)	– спектральная плотность мощности шума на R_v , относящаяся к выходу его приемной антенны.

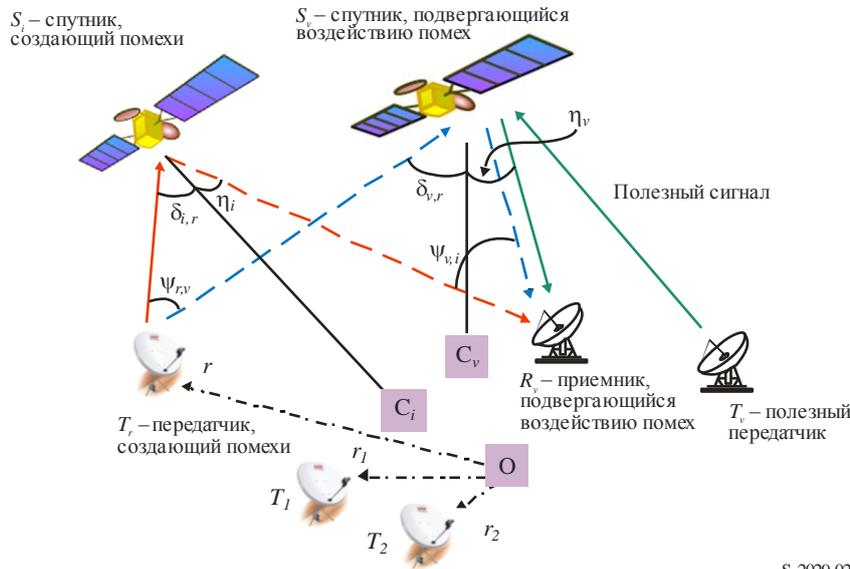
$N_{\uparrow,i}$ (Вт/Гц)	– спектральная плотность мощности шума на S_i на выходе приемной антенны R_v .
N_{CS} (Вт)	– мощность шума в условиях ясного неба на выходе приемной антенны R_v .
N_r (Вт/Гц)	– спектральная плотность мощности шума неба вследствие дождя на выходе приемной антенны R_v .
p_X	– функция плотности вероятности (PDF) переменной X .
P_X	– интегральная функция распределения (CDF) переменной X .
$q_\tau(t)$	– прямоугольный импульс, при котором величина $q_\tau(t) = 1$ для t в пределах $(0, \tau)$, а в остальных случаях равна нулю.
R	– зона, в которой расположены мешающие терминалы.
r (м)	– вектор месторасположения в точке T_r , измеренный от начала отсчета, O .
R_v	– приемный терминал, подвергающийся воздействию помех.
S_i, S_v	– спутники сети, создающей помехи, и линии связи, подвергающейся воздействию помех, соответственно.
T_{long} (с)	– интервал усреднения для долговременных помех.
T_r, T_v	– терминал, создающий помехи, расположенный в точке r , а также терминал, передающий полезный сигнал.
W_{long} (Гц)	– полоса пропускания для определения спектральной плотности мощности долговременных помех.
\bar{X} (дБ)	– значение параметра X в дБ, $10 \log_{10}(X)$.
Z_s	– $Z_s = \frac{(C/N)_{CS}}{(C/N)_s}$, снижение отношения C/N , обусловленное замиранием вследствие дождя в присутствии долговременного компонента помех.
Z_t	– $Z_t = \frac{(C/N)_{CS}}{(C/N)_t}$, снижение отношения C/N , обусловленное замиранием вследствие дождя в присутствии суммарных помех.

6 Статистическая модель анализа помех

Спутниковые сети, являющиеся источниками помех и подвергающиеся воздействию помех, показаны на рисунке 2. Передающие терминалы сети, создающей помехи, обозначаются на рисунке как T_1, T_2, \dots, T_r . Здесь же показаны спутники, подвергающиеся воздействию помех и создающие помехи, S_v и S_i ; терминал, передающий полезные сигналы, T_v ; и приемник, подвергающийся воздействию помех, R_v . Целью анализа является количественное определение помех, создаваемых сетью терминалов T_1, T_2, \dots, T_r , для сети спутников, подвергающейся воздействию помех. Терминалы, создающие помехи, работают в режиме многостанционного доступа с временным разделением, при этом в отдельно взятый момент времени в исследуемой узкой полосе частот передачу сигналов осуществляет только один терминал. Следует отметить, что терминалы могут работать в широкой полосе частот и в режиме многостанционного доступа с частотным разделением; в этой широкой полосе частот помехи рассчитываются путем суммирования помех в каждой узкой полосе частот. На рисунке 2 предполагается, что спутники S_i и S_v используют одно и то же частотное преобразование из линии вверх в линию вниз.

РИСУНОК 2

Трассы помех от терминалов T_1, T_2, \dots, T_r до приемника R_i , подвергающегося воздействию помех, через спутники S_i и S_v . C_i и C_v обозначают центры лучей S_i и S_v на поверхности земли; O – точка отсчета, от которой измеряются расстояния до точек расположения терминалов



S.2029-02

Если предположить, что мешающие терминалы передают сигналы в случайном порядке, то момент времени, в который ведет передачу конкретный мешающий терминал, может быть представлен случайной переменной величиной, зависящей от местоположения. Функция плотности вероятности (PDF) этой случайной переменной обозначается как p_r . Если все мешающие терминалы расположены в Зоне R , из этого следует, что $\int_R p_r(r) dr = 1$.

К мешающим терминалам могут относиться терминалы, имеющие различные размеры апертур антенн. Диаграмма плотности внеосевой э.и.и.м. обычного терминала, расположенного в точке r , обозначается как E . Функция PDF диаграмм плотности э.и.и.м., если речь идет о всех мешающих терминалах, обозначается как p_E . Поскольку это функция плотности вероятности (PDF), из этого следует, что $\int_E p_E(E) dE = 1$, где интегрирование проводится по всем возможным значениям E .

Ошибка наведения антенны в терминале, расположенном в точке r , представляющая собой угол между искомым и фактическим направлениями прицеливания антенны, обозначается как ϕ_r . Эти ошибки наведения антенны могут медленно изменяться и являются статистически независимыми для разных терминалов. В настоящем Приложении предполагается наличие компонентов этой ошибки наведения антенны, связанных с углом места и азимутом, которые обозначаются как $\phi_{r,\varepsilon}$ и $\phi_{r,a}$. Кроме того, предполагается, что функции PDF этих компонентов ошибок наведения антенн, p_ε и p_a , известны.

При определении критерия долговременной помехи необходимо вычислить величину помехи, усредненную по времени. Для упрощения этой задачи целесообразно представить временную диаграмму передачи мешающих терминалов, как показано на рисунке 1. Предположим, что терминал T_{r_n} , расположенный в r_n , ведет передачу во временном интервале (t_n, t_{n+1}) . Последовательность передачи для этих терминалов $T_{r_0}, T_{r_1}, T_{r_2}, \dots$, а соответствующая последовательность интервалов передачи $(t_0, t_1), (t_1, t_2), (t_2, t_3), \dots$. Для представления этой диаграммы обозначим как $q_\tau(t)$ единичный импульс шириной τ , так что величина $q_\tau(t) = 1$ в интервале $(0, \tau)$, и равна нулю вне этого интервала. Таким образом, временная диаграмма передачи для указанных терминалов может быть выражена как $\sum_n T_{r_n} q_{\tau_n}(t - t_n)$, где $\tau_n = (t_{n+1} - t_n)$.

7 Определение долговременной помехи

Долговременная помеха представляет собой усредненное по времени значение помехи в интервале времени T_{long} в отсутствие ошибок наведения антенны. Трассы распространения сигналов от мешающих терминалов до приемника, подвергающегося воздействию помех, проходящие

через спутники, создающие помехи и подвергающиеся воздействию помех, показаны на рисунке 2. Как отмечалось ранее, при проведении аналитического преобразования между частотами на линии вверх и линии вниз предполагается, что эти частоты одинаковы на обоих спутниках. Значения спектральной плотности мощности помех в приемнике, подвергающемся мешающему воздействию через спутники S_v и S_i , обусловленных мешающим терминалом T_r , могут быть выражены исходя из усиления передачи от спутников до приемника, подвергающегося воздействию помех, γ_v и γ_i , и параметров линии следующим образом:

$$I_v(r) = \frac{B_r G_{t,r}(\psi_{r,v}) G_{r,v}^s(\delta_{v,r})}{L_{u,r}} \gamma_v; \quad (8)$$

$$I_i(r) = \frac{B_r G_{t,r}(0) G_{r,i}^s(\delta_{i,r})}{L_{u,r}} \gamma_i,$$

где коэффициенты усиления передачи спутниковой линии, γ_v и γ_i , задаются как:

$$\gamma_v = \frac{B_v^s G_{t,v}^s(\eta_v) G_{r,v}(0) L_{u,v}}{B_v G_{r,v}^s(\delta_{v,v}) L_d}; \quad (9)$$

$$\gamma_i = \frac{B_i^s G_{t,i}^s(\eta_i) G_{r,v}(\psi_{v,i}) L_{u,r}}{B_r G_{r,i}^s(\delta_{i,r}) L_d}.$$

Следует отметить, что коэффициент усиления передачи, γ_i , не зависит от месторасположения мешающего терминала, поскольку является коэффициентом усиления от выхода приемной антенны на спутнике S_i до выхода приемной антенны на терминале, подвергающемся воздействию помех, R_v .

Слагаемые помех, $I_v(r)$ и $I_i(r)$, зависят от конкретного месторасположения мешающего терминала, T_r , и возникают с небольшой вероятностью, $p_r(r) dr$. Поскольку мешающие терминалы могут передавать сигналы с различными уровнями плотности внеосевой э.и.м. и расположены в различных точках пространства, совокупный сигнал помех, создаваемых всеми терминалами, является переменным во времени. Усредненное по множеству значение спектральной плотности мощности помехи, при учете всех мешающих терминалов в сети в требуемой Зоне R , выражается как:

$$\tilde{I}_{avg} = \iint_{R,E} (I_v(r) + I_i(r)) p_E(E) p_r(r) dE dr. \quad (10)$$

Следует отметить, что в данном и последующих разделах рассчитывается спектральная плотность мощности помехи; соответствующая мощность помех может быть получена путем умножения на требуемую ширину полосы.

В настоящем разделе необходимо вычислить значение помехи, усредненное по времени. Следовательно, сигнал помехи должен выражаться как функция времени в отсутствие ошибок наведения антенны. Если используется прямоугольная функция $q_\tau(t)$, спектральная плотность мощности помех может быть выражена как:

$$\tilde{I}_{tot,0}(t) = \sum_n (I_v(r_n) + I_i(r_n)) q_{\tau_n}(t - t_n),$$

где r_n – пространственное расположение мешающего терминала, ведущего передачу во временном интервале (t_n, t_{n+1}) и $\tau_n = (t_{n+1} - t_n)$. Требуемый долговременный компонент помехи представляет собой усредненное по времени значение, приведенное выше, и выражается как:

$$\tilde{I}_{long} = \frac{1}{T_{long}} \int_t^{t+T_{long}} \sum_n (I_v(r_n) + I_i(r_n)) q_{\tau_n}(t - t_n) dt. \quad (11)$$

Как отмечено в п. 3, поскольку $\tilde{I}_{tot,0}$ является статистическим процессом, вышеуказанное значение \tilde{I}_{long} демонстрирует небольшие отклонения, если оно рассчитывается для различных интервалов времени. Функция CDF отношения долговременной помехи к шуму, приведенного в п. 3, накладывает ограничения на эти отклонения.

8 Выражение критерия кратковременного показателя качества

Выражение критерия кратковременного показателя качества, исходя из переменных величин снижения отношения C/N , приведено в п. 4.2. В настоящем разделе приводятся выражения для определения этих величин снижения отношения C/N исходя из переменных параметров линии спутниковой сети, показанной на рисунке 2.

8.1 Снижение отношения C/N , связанное с затуханием вследствие дождя в присутствии долговременной помехи

Выражение $Z_s = \frac{(C/N)_{cs}}{(C/N)_s}$ для снижения отношения C/N , связанного с затуханием вследствие дождя в присутствии долговременного компонента помехи, приведено в п. 4.1. В настоящем подразделе такое ухудшение характеристик рассчитывается исходя из конкретных переменных параметров линии.

Отношение C/N в условиях ясного неба может быть выражено как:

$$(C/N)_{cs} = \frac{C}{N_{\downarrow} + N_{\uparrow} + N_{\uparrow,i} + \tilde{I}_{long}}, \quad (12)$$

где переменные $C, N_{\downarrow}, N_{\uparrow}$ и $N_{\uparrow,i}$ задаются как:

$$C = \frac{B_v G_{r,v}^s (\delta_{v,v}^s)}{L_{u,v}} \gamma_v; \quad N_{\downarrow} = k\Theta_v; \quad N_{\uparrow} = k\gamma_v \Theta_v^s; \quad N_{\uparrow,i} = k\gamma_i \Theta_i^s.$$

Следует отметить, что в уравнении (12), а затем в п. 8.2 отношение C/N выражается исходя из спектральной плотности мощности несущей, шума и помехи. Соответствующий уровень мощности может быть получен путем умножения этих величин на требуемую полосу пропускания.

Далее рассмотрим отношение C/N при наличии затухания вследствие дождя:

$$(C/N)_s = \frac{C/A_{\uparrow}A_{\downarrow}}{N_{\downarrow} + N_{\uparrow}/A_{\downarrow} + N_{\uparrow,i}/A_{\downarrow} + N_r(1-1/A_{\downarrow}) + \tilde{I}_{long}/(A_{\uparrow,i}A_{\downarrow})}. \quad (13)$$

В данном случае предполагается, что орбитальный разнос между спутниками S_v и S_i крайне мал, и поэтому слагаемые замирания на линии вниз от этих спутников одинаковы. Кроме того, предполагается, что слагаемые замирания на линии вверх, обусловленные мешающими терминалами, примерно равны и задаются как $A_{\uparrow,i}$. Это справедливо для зоны покрытия, составляющей несколько сотен километров. В других случаях последнее слагаемое в знаменателе должно быть соответствующим образом изменено, чтобы учесть слагаемое затухания вследствие дождя, зависящее от месторасположения, $A_{\uparrow,i}(r)$.

Снижение отношения C/N в статической ситуации определяется выражением $Z_s = \frac{(C/N)_{cs}}{(C/N)_s}$. Подставляя значения для $(C/N)_{cs}$ и $(C/N)_s$ из уравнений (12) и (13), можно показать, что

$$Z_s = A_{\uparrow} \times (A_{\downarrow}d_1 + d_2 + d_3 / A_{\uparrow,i}), \quad (14)$$

где переменные d_1, d_2 и d_3 определяются как:

$$d_1 = \frac{N_{\downarrow} + N_r}{N_{\downarrow} + N_{\uparrow} + N_{\uparrow,i} + \tilde{I}_{long}}; \quad d_2 = \frac{N_{\uparrow} + N_{\uparrow,i} - N_r}{N_{\downarrow} + N_{\uparrow} + N_{\uparrow,i} + \tilde{I}_{long}}; \quad d_3 = \frac{\tilde{I}_{long}}{N_{\downarrow} + N_{\uparrow} + N_{\uparrow,i} + \tilde{I}_{long}}.$$

Следует отметить, что $(d_1 + d_2 + d_3) = 1$. Для того чтобы выразить параметры d_1, d_2 и d_3 исходя из переменных величин линии связи, введем следующие переменные:

$$c_1 = \frac{N_{\uparrow}}{N_{\downarrow}}; \quad c_2 = \frac{N_{\uparrow,i}}{N_{\downarrow}}; \quad c_3 = \frac{N_r}{N_{\downarrow}}; \quad c_4 = \frac{\tilde{I}_{long}}{N_{\downarrow}}.$$

Подставим эти переменные значения в вышеприведенные параметры d_1 , d_2 и d_3 :

$$d_1 = \frac{1 + c_3}{1 + c_1 + c_2 + c_4}; \quad d_2 = \frac{c_1 + c_2 - c_3}{1 + c_1 + c_2 + c_4}; \quad d_3 = \frac{c_4}{1 + c_1 + c_2 + c_4}.$$

Переменные c_1 , c_2 и c_3 могут быть выражены исходя из параметров спутниковой линии как:

$$c_1 = \frac{\Theta_v^s}{\Theta_v} \gamma_v; \quad c_2 = \frac{\Theta_i^s}{\Theta_v} \gamma_i; \quad c_3 = \frac{\Theta_r}{\Theta_v}; \quad c_4 = \frac{\tilde{I}_{long}}{k\Theta_v}.$$

Поскольку замирания вследствие дождя, как правило, измеряются в децибелах, переменную Z_s снижения отношения C/N в уравнении (14) удобнее анализировать, если она выражена в логарифмических единицах. Выразим Z_s и замирания вследствие дождя в децибелах:

$$\bar{Z}_s = \bar{A}_\uparrow + 10 \log \left(10^{\bar{A}_\downarrow/10} d_1 + d_2 + 10^{-\bar{A}_{\uparrow,i}/10} d_3 \right). \quad (15)$$

Функция CDF переменной \bar{Z}_s , $P_{\bar{Z}_s}(\bar{z}) = \Pr\{\bar{Z}_s \leq \bar{z}\}$ может быть определена аналитическим путем, если известны функции PDF коэффициентов затухания вследствие дождя, \bar{A}_\uparrow , $\bar{A}_{\uparrow,i}$ и \bar{A}_\downarrow . В противном случае для оценки функции CDF переменной \bar{Z}_s может быть использовано моделирование методом Монте-Карло.

8.2 Снижение отношения C/N , обусловленное замиранием вследствие дождя при наличии суммарной помехи

В данном разделе снижение отношения C/N , обусловленное замиранием вследствие дождя при наличии суммарной помехи, $Z_t = \frac{(C/N)_{cs}}{(C/N)_t}$, определяется исходя из параметров спутниковой линии.

Долговременный компонент помехи в п. 7 был определен для случаев, когда мешающие терминалы передают сигналы без ошибок наведения антенны. В этом разделе учитываются ошибки наведения антенн терминалов. Ошибка наведения антенны на T_r обозначается как ϕ_r . При наличии ошибок наведения антенны слагаемые помех в уравнении (8) выражаются как:

$$I_v(r) = \frac{B_r G_{t,r}(\psi_{r,v}(\phi_r)) G_{r,v}^s(\delta_{v,r})}{L_{u,r}} \gamma_v; \quad (16)$$

$$I_i(r) = \frac{B_r G_{t,r}(\psi_{r,i}(\phi_r)) G_{r,i}^s(\delta_{i,r})}{L_{u,r}} \gamma_i,$$

где в явном виде отображена зависимость внеосевых углов $\psi_{r,v}$ и $\psi_{r,i}$ от ϕ_r . Теперь суммарная помеха при наличии ошибок наведения антенны равна $\tilde{I}_{tot} = (I_v(r) + I_r(r))$. Ошибки наведения антенны, как правило, определяются исходя из ошибок в направлениях азимута и угла места, $\phi_{r,a}$ и $\phi_{r,\varepsilon}$. В Приложении 1 к Рекомендации МСЭ-R S.1857 приведен метод определения углов $\psi_{r,v}(\phi_r)$ и $\psi_{r,i}(\phi_r)$ с использованием имеющихся ошибок азимута и угла места.

Отношение C/N в приемнике, подвергающемся мешающему воздействию, обусловленное замиранием вследствие дождя, при наличии суммарной помехи выражается как:

$$(C/N)_t = \frac{C / A_\uparrow A_\downarrow}{N_\downarrow + N_\uparrow / A_\downarrow + N_{\uparrow,i} / A_\downarrow + N_r (1 - 1/A_\downarrow) + \tilde{I}_{tot} / (A_{\uparrow,i} A_\downarrow)}. \quad (17)$$

Аналогично вводу формулы, приведенной в предыдущем разделе, снижение отношения C/N в данном случае, $\bar{Z}_t = 10 \log((C/N)_{cs} / (C/N)_t)$, выражается как:

$$\bar{Z}_t = \bar{A}_\uparrow + 10 \log \left(10^{\bar{A}_\downarrow/10} d_1 + d_2 + 10^{-\bar{A}_{\uparrow,i}/10} \tilde{I}_{tot} d_3 \right), \quad (18)$$

где $\tilde{I}_{tot} = \tilde{I}_{tot} / \tilde{I}_{long}$, а переменные d_1, d_2 и d_3 аналогичны приведенным в предыдущем разделе. Функция CDF переменной \bar{Z}_t , $P_{\bar{Z}_t}(\bar{z}) = \Pr\{\bar{Z}_t \leq \bar{z}\}$ может быть определена аналитическим путем при наличии функций PDF коэффициентов затухания вследствие дождя и функций PDF, указанных в п. 6. В противном случае для расчета функции CDF переменной \bar{Z}_t может быть использовано моделирование методом Монте-Карло.

9 Рост ухудшения качества линии, обусловленный кратковременными помехами

Критерий для кратковременных показателей качества, приведенный в п. 4.2, выражен в понятиях комплементарных функций CDF переменных величин снижения отношения C/N линии, $(1 - P_{\bar{Z}_s}(\bar{z}))$ и $(1 - P_{\bar{Z}_t}(\bar{z}))$. Рассмотрим уровень снижения отношения C/N переменной \bar{z}_j , обусловленного замиранием вследствие дождя и в присутствии долговременной помехи. Ухудшение качества линии (то есть когда \bar{Z}_s превышает \bar{z}_j) в процентном временном отношении в данном случае равно $(1 - P_{\bar{Z}_s}(\bar{z}_j)) \times 100\%$. Далее рассмотрим суммарную помеху, воздействующую на данную линию.

Ухудшение качества линии для того же уровня снижения отношения C/N переменной \bar{z}_j составляет $(1 - P_{\bar{Z}_t}(\bar{z}_j)) \times 100\%$. Следовательно, относительный рост ухудшения качества линии, связанный с наличием кратковременной помехи, равен

$$R_s \% = \frac{(1 - P_{\bar{Z}_t}(\bar{z}_j)) - (1 - P_{\bar{Z}_s}(\bar{z}_j))}{(1 - P_{\bar{Z}_s}(\bar{z}_j))} \times 100\% . \quad (19)$$

Например, предположим, что спутниковая линия спроектирована таким образом, что отношения C/N для этой линии составляет менее $(C/N)_j$ только в течение $p_j\%$ времени. Согласно п. 4.2 должен быть включен энергетический запас линии, поэтому в условиях затухания вследствие дождя и наличия долговременной помехи ухудшение качества ограничивается максимально $p_j\% \times (1 - p_{short}/100)$ времени. Энергетический запас линии, \bar{z}_j , необходимый для выполнения данного условия, может быть рассчитан при помощи функции CDF переменной ухудшения качества следующим образом: $(1 - P_{\bar{Z}_s}(\bar{z}_j)) = p_j \times (1 - p_{short}/100)$. Следовательно, кратковременная помеха должна быть ограничена таким образом, что $(1 - P_{\bar{Z}_t}(\bar{z}_j)) \leq p_j$. Из уравнения (19) видно, что для этих значений $R_s\% \leq p_{short}\%$.

10 Повышение среднего уровня помехи, обусловленное ошибками наведения антенны

Следует отметить, что долговременный компонент помехи, \tilde{I}_{long} , вычисляется в отсутствие ошибок наведения антенны, а слагаемое суммарной помехи, расчет которого приведен в п. 8.2, учитывает ошибки наведения антенны. Кратковременные отклонения уровня помехи обусловлены ошибками наведения антенны и работой терминалов в режиме многостанционного доступа с временным разделением. Отклонениями, обусловленными последним фактором, можно пренебречь, если учитывать среднее значение \tilde{I}_{long} , обозначенное как $\langle \tilde{I}_{long} \rangle$ и приведенное в уравнении (10) как \tilde{I}_{avg} . Это значение может быть реализовано в том случае, если T_{long} достаточно велико по отношению к средней длительности передачи каждого терминала. Чтобы определить влияние ошибок наведения антенны на средний уровень помех, может быть использован следующий показатель:

$$R_L \% = \frac{\langle \tilde{I}_{tot} \rangle - \langle \tilde{I}_{long} \rangle}{\langle \tilde{I}_{long} \rangle} \times 100\% , \quad (20)$$

где $\langle \tilde{I}_{tot} \rangle$ – это среднее значение суммарной помехи. Отметим, что при отсутствии ошибок наведения антенны $\langle \tilde{I}_{tot} \rangle \approx \langle \tilde{I}_{long} \rangle$, поэтому параметром R_L можно пренебречь.

11 Примеры моделирования

В этом разделе приведены наглядные результаты компьютерного моделирования, полученные при помощи методики, представленной в настоящем Приложении. На рисунке 3 показаны места расположения приемника, подвергающегося воздействию помех, и мешающих терминалов относительно центров лучей приемных антенн на спутниках S_i и S_v . Как показано на рисунке, в данной компьютерной модели центры лучей спутников совпадают, и приемник, подвергающийся воздействию помех, расположен в данной точке. Зона R , в которой расположены мешающие терминалы, может быть получена путем равномерного распределения передающих терминалов на территории, представляющей собой круговую зону с центром в точке C_v (или C_i) и радиусом 100 км. Диаметры апертур для антенн мешающих терминалов выбираются случайным образом из набора $\{0,2; 0,25; 0,3; 0,35; 0,4\}$ м, а их диаграмма плотности э.и.и.м. ограничивается следующим образом:

$$\text{ЭИИМ}(\psi) \text{ дБ (Вт/40 кГц)} = \begin{cases} 19 - 25 \log \psi + \tilde{E} \text{ дБ}, & 2^\circ \leq \psi \leq 7^\circ; \\ -2 + \tilde{E} \text{ дБ}, & 7^\circ < \psi \leq 9,2^\circ; \\ 22 - 25 \log \psi + \tilde{E} \text{ дБ}, & 9,2^\circ < \psi \leq 48^\circ; \\ -10 + \tilde{E} \text{ дБ}, & 48^\circ < \psi \leq 180^\circ, \end{cases} \quad (21)$$

где ψ – внеосевой угол, а \tilde{E} – параметр, который может использоваться для увеличения или уменьшения уровней внеосевого излучения терминалов. Следует отметить, что при $\tilde{E} = 0$ уровень внеосевого излучения соответствует определенному в п. 4 раздела *рекомендует* Рекомендации МСЭ-R S.524-9 для земных станций, работающих в сетях ГСО ФСС, передающих сигналы в полосе частот 27,5–30 ГГц. Следующие результаты моделирования приведены для $(\Delta T/T)_{long}$, R_S и R_L в виде функции \tilde{E} . Параметры спутниковой линии и статистические параметры, используемые в компьютерном моделировании, приведены в таблицах 1 и 2 соответственно.

РИСУНОК 3

Зоны обслуживания спутников, подвергающихся воздействию помех и создающих помехи, и распределение мешающих терминалов для данной модели. Здесь C_v и C_i совпадают, и предполагается, что R_v также совпадает с этой точкой

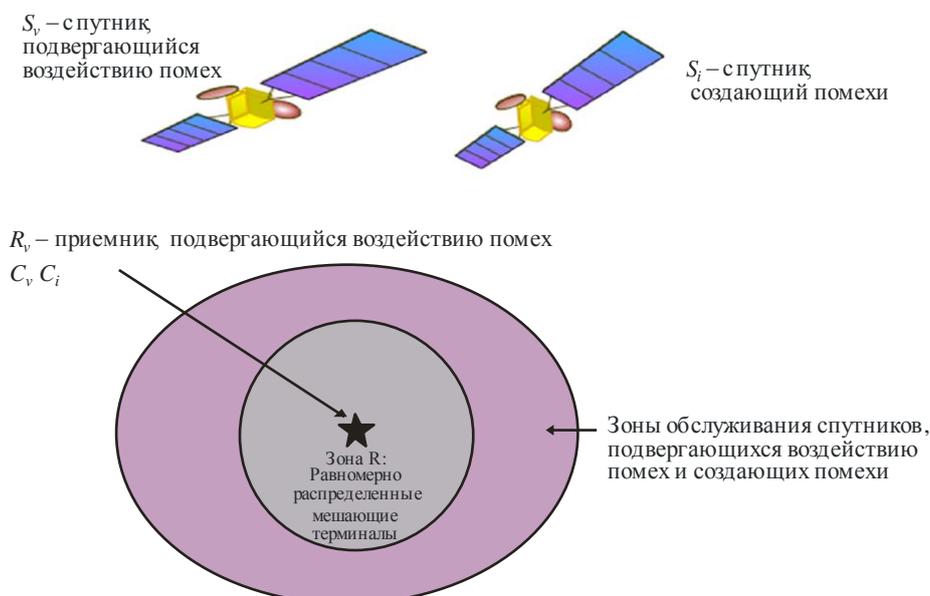


ТАБЛИЦА 1

Параметры спутниковой линии, используемые при компьютерном моделировании

Частота на линии вверх	28,75 ГГц
Потери на линии вверх	213,09 дБ
Передающий терминал, подвергающийся воздействию помех, T_v (широта, долгота)	(40° N, 102,8° E)
Значения высоты станций T_v, T_r	200 м над средним уровнем моря
Уровень и высота слоя осадков на T_v, T_r	Получено с использованием Рекомендаций МСЭ-R P.837 и МСЭ-R P.839
Долгота спутников S_v, S_i	102,8° E и (102,8° + θ_{space}) E
Центры спутниковых лучей, C_v и C_i (широта, долгота)	(40° N, 102,8° E), (40° N, 102,8° E)
Коэффициенты усиления приемных антенн на спутниках, $G_{r,v}^s$ и $G_{r,i}^s$	51,83 дБи
Шумовая температура на спутниках, T_v^s и T_i^s	1000 К
Приемные антенны на спутниках	Круговая апертура 1,75 м с параболическим распределением поля
Плотность э.и.и.м. спутника S_v	30 дБВт/40 кГц
Частота на линии вниз	18,95 ГГц
Потери на линии вниз	209,47 дБ
Коэффициент усиления антенны приемника, подвергающегося воздействию помех, $G_{r,v}$	50,96 дБи (2,4 м), 44,96 дБи (1,2 м)
Высота станции на R_v	200 м над средним уровнем моря
Интенсивность дождя и высота слоя дождя на R_v	Получено с использованием Рекомендаций МСЭ-R P.837 и МСЭ-R P.839
Коэффициенты усиления передачи спутниковых линий (γ_v, γ_i)	(-7,25 дБ, -76,62 дБ) для диаметра 2,4 м апертуры R_v (-13,27 дБ, -64,49 дБ) для диаметра 1,2 м апертуры R_v

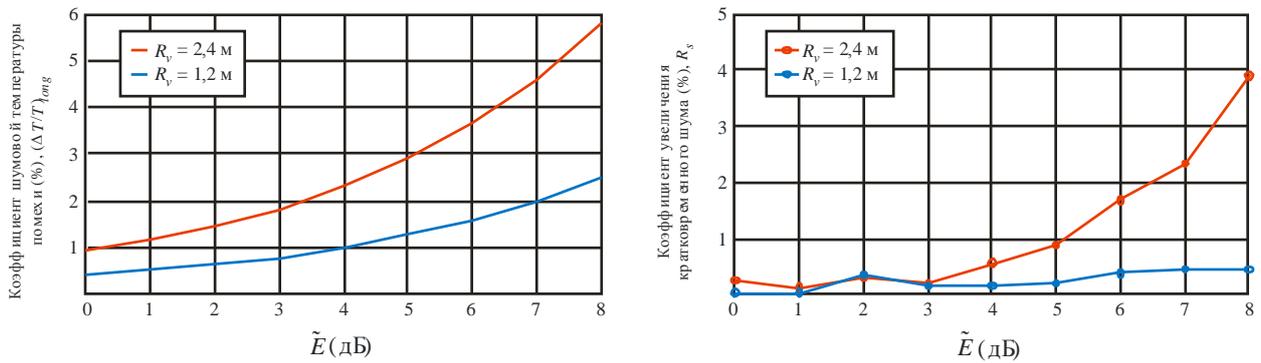
ТАБЛИЦА 2

Статистические параметры, используемые при моделировании

Зона R	Круговая зона с центром в точке C_v, C_i и радиусом 100 км
p_r	Равномерно распределены в Зоне R
p_E	Терминалы с диаметрами апертур {0,2; 0,25; 0,3; 0,35; 0,4} м равномерно распределены, а плотность э.и.и.м. ограничена уравнением (21)
$\phi_{r,\epsilon}$ и $\phi_{r,a}$	Случайные переменные Гаусса со средним нулевым значением и среднеквадратическим отклонением σ

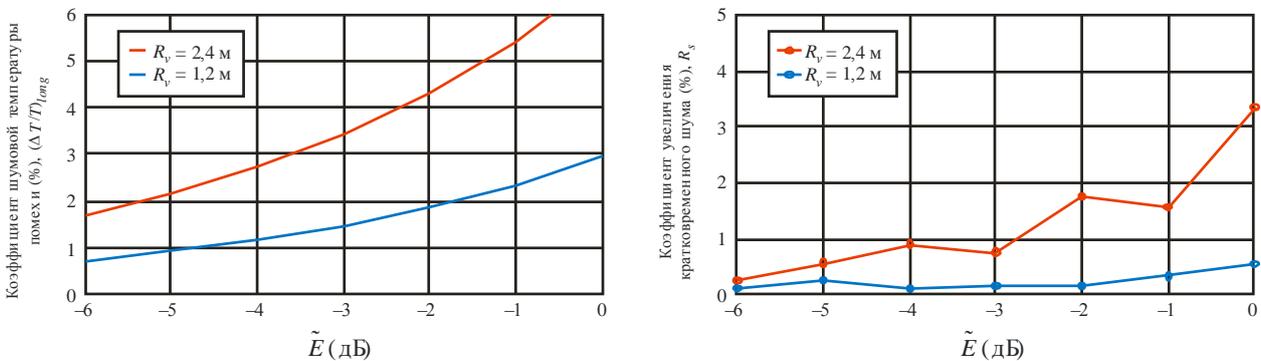
На рисунках 4 и 5 показаны значения $(\Delta T/T)_{long}$ и R_s , приведенные в уравнениях (1) и (19) соответственно. Значение \tilde{I}_{long} в числителе $(\Delta T/T)_{long}$ определяется в предположении весьма большого значения T_{long} . Следовательно, статистическими отклонениями \tilde{I}_{long} можно пренебречь. Как можно видеть, для показательных параметров, приведенных в таблицах 1 и 2, и при орбитальном разnose спутника, равном 4°, уровень плотности э.и.и.м., соответствующий $\tilde{E} = 7,3$ дБ, приводит к тому, что $(\Delta T/T)_{long} = 5\%$ для приемника, подвергающегося воздействию помех с диаметром апертуры, равным 2,4 м. Если бы орбитальный разнос составлял 3°, то для поддержки одинакового уровня $(\Delta T/T)_{long}$ значение \tilde{E} должно быть снижено до -1,3 дБ. На этих рисунках показано, что $(\Delta T/T)_{long}$ имеет меньшее значение при диаметре апертуры 1,2 м приемника, подвергающегося воздействию помех. На рисунках 4 и 5 показано также значение R_s , используемое в кратковременном критерии. В этом случае $p_j\%$ и $p_{short}\%$ были заданы равными 2% и 10% соответственно. Для параметров, рассмотренных в данном показательном примере, значение R_s составляет менее 4%. Из уравнения (19) следует, что это соответствует уровню ухудшения качества линии менее 1,88%.

РИСУНОК 4

Отклонения $(\Delta T/T)_{long}$ и R_s при \tilde{E} в (21) для $\theta_{space} = 4^\circ$ и $\sigma = 0,5^\circ$ 

S.2029-04

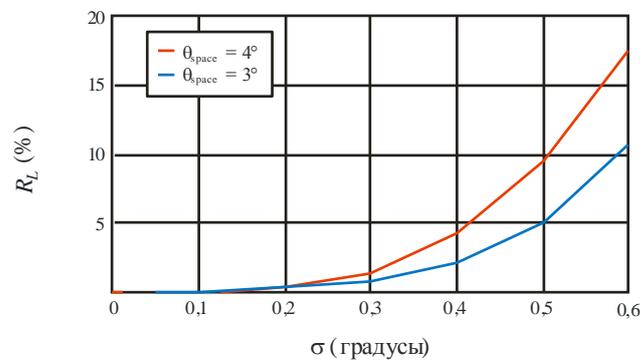
РИСУНОК 5

Отклонения $(\Delta T/T)_{long}$ и R_s при \tilde{E} в (21) для $\theta_{space} = 3^\circ$ и $\sigma = 0,5^\circ$ 

S.2029-05

Значение R_L , используемое в уравнении (20), приведено на рисунке 6 для различных значений σ . Как отмечалось ранее, при достаточно больших значениях T_{long} в отсутствие ошибок наведения антенны отклонениями R_L можно пренебречь. На этом рисунке показано постепенное увеличение R_L при возрастании значений σ .

РИСУНОК 6

Изменение R_L в зависимости от среднеквадратического отклонения ошибок наведения антенны для значений орбитального разноса 3° и 4° 

S.2029-06

12 Выводы

В настоящем Приложении представлен новый статистический метод оценки помех, создаваемых переменной во времени системой, состоящей из сети земных станций, работающих по схеме многостанционного доступа с временным разделением. Полученные результаты используются для наглядного отображения потенциального ухудшения характеристик спутниковой сети, подвергающейся воздействию помех. Показано, что уровни передаваемых сигналов от сетевых мешающих терминалов могут регулироваться в целях обеспечения соответствия допустимым характеристикам помех и показателям качества спутниковых систем, подвергающихся мешающему воздействию. В Дополнении к настоящему Приложению приведен наглядный пошаговый процесс оценки функции CDF переменных $(\Delta T/T)_{long}$ и R_S .

Дополнение

Наглядный пошаговый процесс оценки функции CDF переменных $(\Delta T/T)_{long}$ и R_S

В настоящем Дополнении приведен наглядный пошаговый процесс оценки функции CDF переменной $(\Delta T/T)_{long}$, выраженной в п. 3, а также соответствующего роста ухудшения качества, обусловленного кратковременной помехой, R_S , согласно уравнению (19) Приложения. Эти величины оцениваются для заданного уровня плотности внеосевой э.и.и.м. Представленный здесь подход основан на моделировании Монте-Карло.

1 Исходные данные для процесса оценки

Исходные данные 1. Параметры спутниковой линии

Значения длины волны, λ_u , λ_d , линий вверх и вниз; значения долготы спутников S_v , S_i ; парные значения широты и долготы на C_i , C_v ; диаграммы усиления приемных антенн, $G_{r,i}^S$, $G_{r,v}^S$; значения шумовой температуры Θ_i^S , Θ_v^S ; коэффициенты усиления передачи, γ_i , γ_v .

Шумовая температура Θ_v .

Исходные данные 2. Мешающие терминалы

Функция PDF пространственного распределения терминалов, p_r ; функция PDF распределения плотности э.и.и.м., p_E . Следует отметить, что плотность э.и.и.м. зависит от размера апертуры терминала. Кроме того, учитывается предельный уровень плотности внеосевой э.и.и.м.

Ошибки наведения антенн: функции PDF компонентов ошибки наведения антенны, связанных с азимутом и углом места, p_{ϕ_a} , p_{ϕ_ϵ} . Как вариант, эти компоненты могут быть выражены в виде векторов длины N_{mc} (определение дано в разделе 5 "Исходные данные."), $\{\phi_{r,a}\}$, $\{\phi_{r,\epsilon}\}$.

Диаграмма передачи терминалов: функция PDF длительности передачи для терминалов, p_τ , где τ – длительность передачи терминала, рассмотренная в п. 6.

Исходные данные 3. Параметры, связанные с дождевыми осадками

Интенсивность дождя, высота над средним уровнем моря и высота слоя дождевых осадков для точек расположения T_v , R_v и репрезентативный центр Зоны R , определяемый как p_r . Эти параметры могут быть рассчитаны при помощи Рекомендаций МСЭ-R P.837 и МСЭ-R P.839.

Шумовая температура неба, связанная с дождем, Θ_r .

Исходные данные 4. Параметры для расчета уровней долговременных и кратковременных помех

Интервал наблюдения для долговременных помех, T_{long} ; процент времени возможного ухудшения качества линии связи в кратковременных показателях качества, $p_i\%$; а также максимальное время в процентном отношении для кратковременных помех, $p_{short}\%$.

Исходные данные 5. Параметр моделирования Монте-Карло: размер выборки случайного вектора N_{mc} .

2 Оценка функции CDF переменной $(\Delta T/T)_{long}$

Шаг 1. Формирование интервалов времени передачи для мешающих терминалов

Формируем интервалы времени передачи N_{long} , $\{\tau_n\}$ согласно функции PDF p_τ таким образом, чтобы сумма всех интервалов времени передачи удовлетворяла условию $\sum_{n=1}^{N_{long}-1} \tau_n < T_{long} \leq \sum_{n=1}^{N_{long}} \tau_n$.

Шаг 2. Формирование мешающих передающих терминалов,

- Формируем N_{long} -мерный вектор местоположения $\{r\}$ согласно функции PDF p_r .
- Выбираем плотность э.и.и.м. терминала в каждой точке расположения, r , согласно функции PDF p_E .

Шаг 3. Расчет слагаемых помех, $I_i(r)$ и $I_v(r)$

- Угол $\psi_{r,v}$. Вычисляется с использованием значений широты и долготы в точках r , S_i и S_v .
- Углы $\delta_{i,r}$ и $\delta_{v,r}$. Вычисляются с использованием значений широты и долготы в точках r , S_i , S_v , C_i и C_v .
- Рассчитываем потери на трассе линии вверх, $L_{u,r}$.
- Сигнал помехи $(I_i(r) + I_v(r))$ рассчитывается с использованием уравнения (8). Следует отметить, что $B_r G_{t,r}(\psi_{r,v})$ – это плотность э.и.и.м. в направлении S_v , а $B_r G_{t,r}(0)$ – это плотность э.и.и.м. в направлении S_i .

N_{long} -мерный вектор, полученный путем вычисления $\{I_i(r) + I_v(r)\}$ во всех $\{r\}$ точках расположения, дает мгновенные значения помех при отсутствии ошибок наведения антенны.

Шаг 4. Расчет долговременной помехи \tilde{I}_{long}

- Строим сигнал помехи, $\tilde{I}_{tot,0}(t)$ как функцию времени (согласно описанию в п. 7).

$\tilde{I}_{tot,0}(t) = \sum_{n=1}^{N_{long}} (I_i(r_n) + I_v(r_n)) q_{\tau_n}(t - t_n)$, где r_n – это n -й компонент $\{r\}$, $t_1 = 0$, а $t_n = \sum_{i=1}^{n-1} \tau_i$.

- Вычисляем $\tilde{I}_{long} = \frac{1}{T_{long}} \int_{t=0}^{T_{long}} \tilde{I}_{tot,0}(t) dt$.

Шаг 5. Оценка функции CDF переменной $(\Delta T/T)_{long}$

- Строим N_{mc} -мерный вектор $\{\tilde{I}_{long}\}$ путем N_{mc} -кратного повторения шагов 1–4, указанных выше.
- Строим N_{mc} -мерный вектор $\{(\Delta T/T)_{long}\}$ при помощи (1) и вектора $\{\tilde{I}_{long}\}$.
- Вычисляем функцию CDF вектора $\{(\Delta T/T)_{long}\}$.

3 Оценка R_s

Шаг 1. Формирование мешающих передающих терминалов

- Формируем N_{mc} -мерный вектор местоположения $\{r\}$ согласно функции PDF p_r .
- Выбираем плотность э.и.и.м. терминала в каждой точке расположения, r , согласно функции PDF p_E .

Шаг 2. Вычисляем N_{mc} -мерный вектор помех $\{I_i(r) + I_v(r)\}$

Переходим к шагу 3 в п. 2, приведенном выше.

Шаг 3. Функция CDF переменной \bar{Z}_s

- Определяем переменные c_1, c_2 и c_3 , приведенные в п. 8.1, используя параметры спутниковой линии и N_{mc} -мерный вектор $\{\bar{I}_{long}\}$, предварительно рассчитанный на шаге 5 в п. 2, выше.
- Определяем переменные d_1, d_2 и d_3 при помощи c_1, c_2 и c_3 , как показано в п. 8.1. Следует отметить, что d_1, d_2 и d_3 – это N_{mc} -мерные векторы.
- Формируем N_{mc} -мерные векторы затухания вследствие дождя $\{\bar{A}_\uparrow\}, \{\bar{A}_{\uparrow,i}\}$ и $\{\bar{A}_\downarrow\}$ при помощи Рекомендации МСЭ-R P.618-8. В данном случае $\{\bar{A}_{\uparrow,i}\}$ соответствует одиночной репрезентативной точке расположения в Зоне R , определяемой функцией PDF p_r .
- Для каждой реализации $(\bar{A}_\uparrow, \bar{A}_{\uparrow,i}, \bar{A}_\downarrow)$ и (d_1, d_2, d_3) рассчитываем переменную \bar{Z}_s , выраженную в уравнении (15). Таким образом, получаем N_{mc} -мерный вектор для \bar{Z}_s .
- При помощи этого вектора вычисляем функцию CDF переменных $\bar{Z}_s, P_{\bar{Z}_s}(\bar{z})$.

Шаг 4. Функция CDF переменной \bar{Z}_t

- Формируем N_{mc} -мерный вектор ошибки наведения антенны $\{\phi_r\}$.
Формируем N_{mc} -мерные векторы $\{\phi_{r,a}\}$ и $\{\phi_{r,\epsilon}\}$ при помощи соответствующих им функций PDF, $p_{\phi_a}, p_{\phi_\epsilon}$. Для каждой реализации $(\phi_{r,a}, \phi_{r,\epsilon})$ рассчитываем ϕ_r , используя процедуру, описанную в Приложении 1 Рекомендации МСЭ-R S.1857.
- Формируем N_{mc} -мерный вектор помехи $\{I_i(r) + I_v(r)\}$, приведенный в уравнении (16).
Для каждой реализации r и ϕ_r рассчитываем $I_i(r)$ и $I_v(r)$, как указано в уравнении (16). На основе этого строим N_{mc} -мерный вектор помехи.
- При помощи уравнения (18) рассчитываем N_{mc} -мерный вектор \bar{Z}_t .
- Используя этот вектор, даем оценку функции CDF переменных $\bar{Z}_t, P_{\bar{Z}_t}(\bar{z})$.

Шаг 5. Оценка R_s

- Рассчитываем энергетический запас линии, необходимый в условиях замирания вследствие дождя и долговременных помех, \bar{z}_j , таким образом, чтобы максимальное время, допустимое для ухудшения качества, составило $p_j\% \times (1 - p_{short}/100)$:

$$(1 - P_{\bar{Z}_s}(\bar{z}_j)) = p_j \times (1 - p_{short}/100).$$

- Для данного энергетического запаса линии рассчитываем продолжительность времени, допустимого для ухудшения качества линии при наличии суммарной помехи, $(1 - P_{\bar{Z}_t}(\bar{z}_j))$.
- Вычисляем R_s при помощи уравнения (19).