

МСЭ-R

Сектор радиосвязи МСЭ

Рекомендация МСЭ-R S.1857
(01/2010)

**Методики оценки уровней плотности
внеосевой э.и.и.м. и определения помех
в направлении соседних спутников,
которые возникают в результате ошибок
наведения земных станций,
установленных на транспортных
средствах, в полосе частот 14 ГГц**

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 1 МСЭ-R. 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 1 МСЭ-R.

Электронная публикация
Женева, 2010 г.

© ITU 2010

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.1857

Методики оценки уровней плотности внеосевой э.и.и.м. и определения помех в направлении соседних спутников, которые возникают в результате ошибок наведения земных станций, установленных на транспортных средствах, в полосе частот 14 ГГц

(Вопрос МСЭ-R 208/4)

(2010)

Сфера применения

В настоящей Рекомендации представлены общие характеристики ошибок наведения антенн земных станций, установленных на транспортных средствах с активной следящей системой антенны, а также представлена методика оценки потенциальных помех в направлении соседних спутников, работающих в системах ФСС на ГСО.

Ассамблея радиосвязи МСЭ,

учитывая,

- a) что спутники ФСС ГСО хорошо подходят для предоставления услуг интернета и услуг передачи данных на базе широкого диапазона конфигураций сети;
- b) что существует возрастающая потребность в поддержке мобильности пользователей и предоставления широкополосных услуг конечным пользователям;
- c) что терминалы земных станций, установленные на транспортных средствах (VMES), могут обеспечивать широкий диапазон услуг связи через спутники ФСС в полосе частот 14 ГГц;
- d) что необходимо защищать сети ФСС от любых потенциальных помех, создаваемых такими терминалами VMES;
- e) что эффективное использование радиочастотного спектра и ГСО терминалами VMES может достигаться при использовании модели плотности внеосевой э.и.и.м. и помех от таких терминалов;
- f) что для случая VMES необходимы статистические методы определения их уровней плотности внеосевой э.и.и.м. и помех соседним спутникам;
- g) что при проектировании спутниковых сетей, в которых используются VMES, может быть предусмотрено соответствие пределам помех, требуемым операторами соседних спутниковых систем;
- h) что было бы целесообразным иметь методики оценки уровней помех и их влияния на готовность линий спутниковых сетей, подвергающихся воздействию помех, которые возникают в результате колебаний уровней плотности внеосевой э.и.и.м. антенн VMES со столь малым диаметром, что невозможно выполнить значимую оценку с помощью имеющихся методик,

отмечая,

- a) что максимальные допустимые уровни плотности внеосевой э.и.и.м. от терминалов с очень малой апертурой (VSAT), указаны в Рекомендации МСЭ-R S.728;
- b) что максимальные допустимые уровни межсетевых помех, вызываемых излучениями земных и космических станций всех других спутниковых сетей, которые работают в той же полосе частот, указаны в МСЭ-R S.1323,

рекомендует,

- 1 что для оценки уровней плотности внеосевой э.и.и.м., обусловленных ошибками наведения антенны VMES, могут использоваться методика и соответствующая модель, представленные в Приложении 1;
- 2 что для оценки уровней помех, возникающих в результате колебаний уровней плотности внеосевой э.и.и.м. VMES, может использоваться методика, представленная в Приложении 2;
- 3 что для оценки воздействия на неготовность линии подвергающейся воздействию помех системы, в ситуациях, когда изменяющиеся во времени ошибки наведения антенны VMES описанного в Примечании 2 типа, являются существенными, может использоваться методика, представленная в Приложении 2;
- 4 что Примечания 1–5 следует рассматривать как часть настоящей Рекомендации.

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Методика, представленная в Приложении 2, может использоваться для оценки воздействия потенциальных помех от VMES.

ПРИМЕЧАНИЕ 2. – Методики, представленные в настоящей Рекомендации, разработаны для VMES, оборудованных направленными зеркальными антеннами, эквивалентный диаметр которых лежит в диапазоне от 0,3 м до 1,0 м, а также механическими или электронными следящими системами и поддерживающих скорость транспортного средства до 100 км/ч. Вместе с тем эти методики могут применяться в случае антенн других размеров и других значений скорости движения транспортного средства.

ПРИМЕЧАНИЕ 3. – Параметры и примеры, приведенные в Приложениях, представляют системы, которые работают в полосе частот 14 ГГц.

ПРИМЕЧАНИЕ 4. – Методика, описанная в настоящей Рекомендации, применяется в том случае, когда следящие системы VMES осуществили захват своего целевого спутника.

ПРИМЕЧАНИЕ 5. – Для применения настоящей Рекомендации необходимо знать репрезентативные величины α и c , которые используются в разделе 2 Приложения 1.

Приложение 1

Модель оценки уровней плотности внеосевой э.и.и.м., которые являются результатом ошибок наведения антенн VMES

1 Введение

Возникший в последнее время спрос на применения связи в движении обусловил интерес к новому типу спутниковых терминалов. В общем, в состав этих терминалов, которые устанавливаются на транспортных средствах, входят малые высокопроизводительные антенны, следящие системы с устройствами сервоуправления и позиционирования, а также соответствующее оборудование промежуточной частоты (ПЧ) и радиочастоты (РЧ). Размеры антенны и другие параметры передачи выбираются так, чтобы обеспечить двустороннюю связь в различных топографических и эксплуатационных условиях. Рассматриваемые в данном Приложении терминалы должны работать в составе ФСС в полосе частот 14 ГГц. В настоящее время эти терминалы проходят испытания для использования на наземных транспортных средствах и поездах.

Устанавливаемые на транспортных средствах терминалы, как показано в настоящем вкладе, могут вызывать дополнительные помехи в направлении соседних спутников вследствие ошибок наведения антенны, вызываемых движением. С точки зрения оператора спутника, эти помехи должны удерживаться на минимальном уровне. С другой стороны, поставщики услуг будут стремиться так спроектировать свои системы, чтобы терминалы обеспечивали достаточную мощность передачи для поддержки приложений конечного пользователя в отношении приемлемой скорости передачи данных. В данном Приложении рассматриваются эти противоречивые требования, то есть необходимость передачи значительной энергии для поддержки достаточной скорости передачи данных при удержании уровня помех на приемлемом для операторов спутников уровне.

В применениях связи в движении ошибки наведения антенны и ошибки следящей системы, вызываемые движением платформы антенны, могут привести к ошибкам наведения антенны. Как правило, эти ошибки наведения антенны вследствие ее движения невелики и имеют случайный характер, вызывая случайные изменения плотности внеосевой э.и.и.м. Для оценки воздействия помех на другие спутники необходимо создать модель и количественно оценить плотность э.и.и.м. таких терминалов.

В данном Приложении представлены статистическая модель для оценки уровней плотности э.и.и.м., обусловливаемых ошибками наведения антенны, а также подход к разработке иллюстративной статистической маски плотности э.и.и.м. на внеосевых направлениях. В этой иллюстративной статистической маске учтены типовые эксплуатационные характеристики терминалов, устанавливаемых на транспортных средствах, и она может использоваться для ограничения уровня внеосевых излучений этих терминалов. Для спутникового земного терминала плотность э.и.и.м. на внеосевых направлениях прямо пропорциональна плотности э.и.и.м. в направлении прицеливания¹. В данном приложении представлена методика определения соответствующих уровней плотности э.и.и.м. в направлении прицеливания, с тем чтобы удовлетворить требования вышеуказанной иллюстративной статистической маски.

2 Ошибки наведения антенны, обусловленные ее движением

При определенных условиях движения платформы антенны линия прицеливания антенны будет смещаться. Ошибка наведения антенны может быть представлена случайной величиной ϕ , которая означает угловое расстояние между фактическим и планируемым направлениями прицеливания антенны. Во многих применяемых на практике установках ошибка наведения антенны измеряется по ее компонентам: ошибке по углу места ϕ_ϵ , и ошибке по азимутальному углу ϕ_a . Эти компоненты ошибки могут быть представлены взаимно независимыми случайными величинами, статистическое распределение которых оценивается на основании измерений, выполняемых при движении по репрезентативным автомобильным трассам. Функция плотности вероятности (PDF) величины ϕ_x имеет обозначение f_{ϕ_x} , где $x = \epsilon, a$. Для наглядности целесообразно представить эти функции PDF через известные статистические распределения. Лабораторные измерения ошибки наведения антенны, обусловленной движением, показывают, что эти ошибки наведения имеют характеристики с длинной асимптотической частью, то есть PDF не будет быстро спадать при больших значениях ошибки наведения антенны. Примером распределения с длинной асимптотической частью является симметричное альфа-устойчивое ($S\alpha S$) распределение [Shao and Nikias, 1993; Samorodnitsky and Taqqu, 1994], которое используется для представления, в иллюстративных целях, функций PDF ошибки наведения антенны по углу месту и азимуту. Распределение $S\alpha S$ имеет много параметров, которые могут использоваться для генерирования функций PDF, а также гауссовского распределения в качестве частного случая. Характеристическая функция распределения $S\alpha S$ с нулевым параметром сдвига имеет вид:

$$\psi(x) = e^{-|cx|^\alpha}, \quad (1)$$

где $c > 0$ – параметр масштаба или дисперсия, а α , $0 < \alpha \leq 2$ – характеристический показатель. Асимптотическая часть распределения определяется показателем α , при этом чем меньше его значения, тем длиннее асимптотическая часть, а c пропорционально ширине функции PDF. Заметим, что если $\alpha = 2$, вышеуказанное становится частным случаем, то есть гауссовским распределением с нулевым средним значением и дисперсией $2c^2$. На рисунке 1 показана интегральная функция распределения (CDF) распределения $S\alpha S$ при $c = 0,14$ и $0,35^\circ$ и разных значениях α . По рисунку видно, что, изменяя значения этих двух параметров, возможно представить множество типов ошибок наведения антенны, которые встречаются на практике.

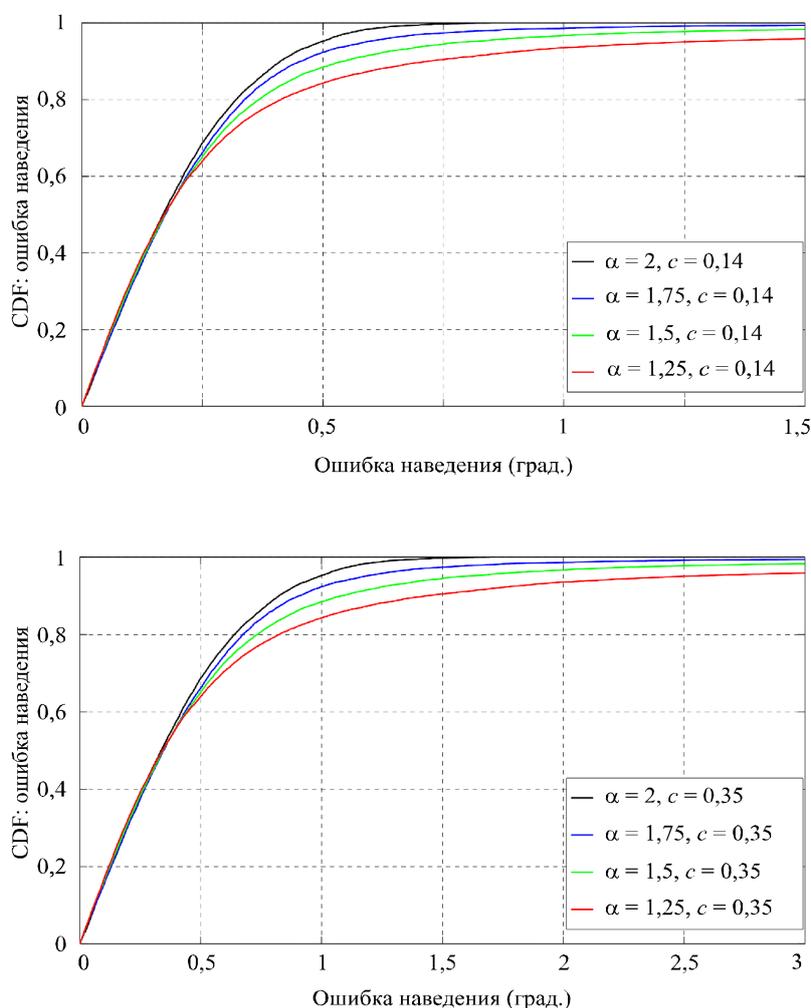
Наглядное обоснование выбора распределения $S\alpha S$ в качестве модели ошибок наведения антенны, обусловливаемых движением, можно представить следующим образом. Наблюдаемые ошибки наведения антенны зависят от многих параметров, например от характеристик антенны, топографических особенностей местности, скорости движения платформы антенны, углов места и

¹ Направление прицеливания определяется как направление, в котором усиление антенны является наибольшим, то есть как направление по оси антенны.

азимутальных углов, следящей системы антенны, устройств оценки местоположения и позиции, а также измерений силы сигнала. В качестве исходного условия может быть принято, что ошибки, вносимые всеми этими разными параметрами, являются независимыми. В этом случае для моделирования кумулятивного воздействия всех этих источников ошибки с помощью распределения $S\alpha S$ может применяться обобщенная центральная предельная теорема [Samorodnitsky and Taqqu, 1994]. Заметим, что аналогичный аргумент в отношении центральной предельной теоремы применялся для случая оптических линий при моделировании ошибок наведения и слежения с гауссовским распределением [Chen and Gardner, 1989; Correl, 1996]. Вместе с тем в отличие от оптического применения эксплуатационные условия, рассматриваемые в настоящем Приложении, включают пересеченную местность, следовательно, должны учитываться компоненты ошибки, характеризующиеся распределением с длинной асимптотической частью.

РИСУНОК 1

Функция CDF абсолютного значения ошибки наведения антенны при разных значениях α и c



1857-01

3 Статистическая характеристика плотности внеосевой э.и.и.м.

В предыдущем разделе ошибки наведения антенны рассматривались как случайные величины. Эти случайные ошибки наведения будут вызывать изменение результирующего уровня плотности э.и.и.м., происходящее случайным образом. В данном разделе уровень плотности э.и.и.м. рассматривается как случайная величина и определяется его CDF.

Для определения уровня плотности внеосевой э.и.и.м. для наглядности рассмотрим следующую нормированную диаграмму направленности для параболической зеркальной антенны с круговой апертурой [Maral and Bousquet, 2000]:

$$G(\varphi) = \left(\frac{2^{n+1} (n+1)! J_{n+1}(\pi d / \lambda \times \sin \varphi)}{(\pi d / \lambda \times \sin \varphi)^{n+1}} \right)^2, \quad (2)$$

где:

- φ : угол отклонения от оси;
- J_{n+1} : функция Бесселя первого рода и порядка $(n+1)$;
- d : диаметр круговой апертуры;
- λ : длина волны.

В вышеприведенном уравнении n является параметром распределения поля по апертуре, который соответствует следующим распределениям поля по апертуре:

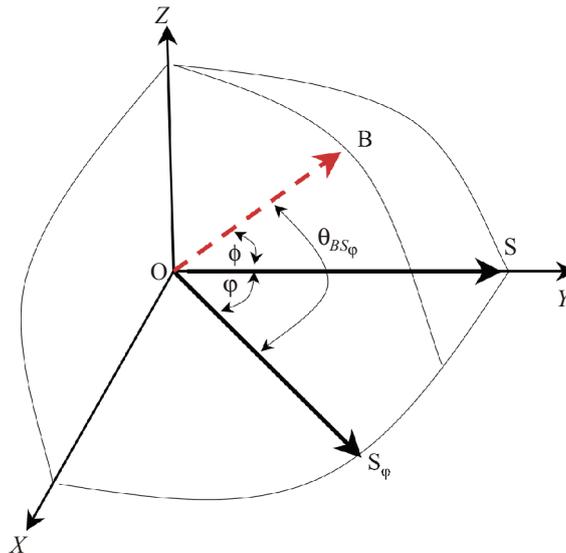
- $n = 0$, идеальное равномерное;
- $n = 1$, параболическое;
- $n = 2$, параболическое квадратичное.

Главный лепесток большинства используемых на практике систем с апертурой попадает между нормированными диаграммами направленности, соответствующими $n = 1$ и $n = 2$. Заметим, что боковые лепестки реальных антенн могут не точно соответствовать уравнению (2), однако это не является недостатком для анализа, поскольку данная работа в основном посвящена терминалам с очень малой апертурой, параметры которых ограничиваются главным, нежели боковыми, лепестком.

РИСУНОК 2

Геометрическое представление ошибки наведения антенны φ .

Используются следующие обозначения: земной терминал в начале координат O , S – предполагаемый для использования спутник, OB – направление прицеливания антенны, φ – угол отклонения от оси в точке S_φ и θ_{BS_φ} – угловое расстояние между направлением прицеливания и направлением S_φ



Рассмотрим уровень плотности внеосевой э.и.и.м. в случае наличия ошибки наведения антенны ϕ . Как определено в разделе 2, ϕ является ошибкой в направлении прицеливания антенны. На рисунке 2 геометрически представлено направление прицеливания антенны OB в случае наличия ошибки наведения антенны. Земной терминал находится в точке O , а S представляет местоположение предполагаемого для использования спутника, поэтому осью антенны в отсутствие ошибок наведения является OS . Угол отклонения от оси имеет обозначение ϕ , а это направление – обозначение OS_ϕ . Угловое расстояние между линией прицеливания антенны и OS_ϕ при наличии ошибок наведения антенны обозначено как θ_{BS_ϕ} . Заметим, что в отсутствие ошибок наведения антенны $\theta_{BS_\phi} = \phi$. Теперь уровень плотности внеосевой э.и.и.м. в направлении OS_ϕ можно описать следующим образом:

$$E_\phi(\phi) = E_B \left(\frac{2^{n+1}(n+1)!J_{n+1}(\pi d/\lambda \times \sin \theta_{BS_\phi})}{(\pi d/\lambda \times \sin \theta_{BS_\phi})^{n+1}} \right)^2, \quad (3)$$

где E_B – плотность э.и.и.м. в направлении линии прицеливания. Для определения CDF параметра $E_\phi(\phi)$ необходимо выразить его через основные случайные величины ϕ_ϵ и ϕ_a . Заметим, что θ_{BS_ϕ} является функцией ϕ_ϵ и ϕ_a и, используя приведенное на рисунке 2 геометрическое представление, его можно описать через угол места и азимутальный угол в направлениях OB и OS_ϕ следующим образом:

$$\cos \theta_{BS_\phi} = \cos \epsilon_{BS_\phi}^- - (\cos \epsilon_{BS_\phi}^+ + \cos \epsilon_{BS_\phi}^-) \times \sin^2 \frac{a_{BS_\phi}^-}{2}, \quad (4)$$

где $\epsilon_{BS_\phi}^- = (\epsilon_B - \epsilon_{S_\phi})$ и $\epsilon_{BS_\phi}^+ = (\epsilon_B + \epsilon_{S_\phi})$ – разность и сумма углов места в направлениях OB и OS_ϕ , а $a_{BS_\phi}^- = (a_B - a_{S_\phi})$ – разность между азимутальными углами в направлениях OB и OS_ϕ , соответственно. Для данных значений местоположения земного терминала и точек S и S_ϕ могут быть рассчитаны следующие функции угла места и азимутального угла: $\epsilon_{SS_\phi}^- = (\epsilon_S - \epsilon_{S_\phi})$, $\epsilon_{SS_\phi}^+ = (\epsilon_S + \epsilon_{S_\phi})$ и $a_{SS_\phi}^- = (a_S - a_{S_\phi})$. Далее, поскольку в отсутствие ошибок наведения направлением прицеливания антенны является OS , $\epsilon_B = (\epsilon_S - \phi_\epsilon)$ и $a_B = (a_S - \phi_a)$. Объединяем эти три выражения:

$$\begin{aligned} \epsilon_{BS_\phi}^- &= (\epsilon_{SS_\phi}^- - \phi_\epsilon) \\ \epsilon_{BS_\phi}^+ &= (\epsilon_{SS_\phi}^+ - \phi_\epsilon) \\ a_{BS_\phi}^- &= (a_{SS_\phi}^- - \phi_a). \end{aligned} \quad (5)$$

Для данной геометрии земного терминала и спутниковых точек S и S_ϕ можно определить количественные значения $\epsilon_{SS_\phi}^-$, $\epsilon_{SS_\phi}^+$ и $a_{SS_\phi}^-$. Далее, подставляя уравнение (5) в уравнение (4), получаем описание θ_{BS_ϕ} как функции ошибок по углу места и азимутальному углу, а также предопределенных угла места и азимутального угла к точкам S и S_ϕ .

Используя описанную выше процедуру и уравнение (3), уровень плотности э.и.и.м. во внеосевом направлении ϕ , $E_\phi(\phi)$, можно описать с помощью случайных величин ошибки наведения антенны ϕ_ϵ и ϕ_a . Обозначим PDF параметра $E_\phi(\phi)$ как f_{E_ϕ} . Поскольку, для наглядности, функции PDF величин ϕ_ϵ и ϕ_a представлены распределениями $S\alpha S$, f_{E_ϕ} можно определить, используя уравнения (3), (4) и (5).

Желательная PDF может быть определена с помощью либо аналитических методов, либо моделирования по методу Монте-Карло. Функция CDF плотности э.и.и.м. определяется следующим образом: $\Pr\{E_\phi(\phi) < y\} = F_{E_\phi}(y) = \int_0^y f_{E_\phi}(x) dx$. Заметим, что эта CDF является функцией плотности э.и.и.м. в направлении прицеливания E_B .

4 Расчет вероятности превышения эталонного уровня плотности э.и.и.м.

В предыдущем разделе была представлена процедура определения CDF уровня плотности внеосевой э.и.и.м. С помощью этой процедуры может быть определена вероятность того, что уровень плотности внеосевой э.и.и.м. превысит определенный эталонный пороговый уровень. Обозначим этот эталонный уровень как $E_{Ref}(\phi)$, что в принципе может быть функцией ϕ . Вероятность превышения уровня плотности э.и.и.м. данного эталонного уровня во внеосевом направлении ϕ , $\Pr\{E_\phi(\phi) > E_{Ref}(\phi)\}$, описывается следующим образом:

$$\Pr\{E_\phi(\phi) > E_{Ref}(\phi)\} = \int_{E_{Ref}(\phi)}^{\infty} f_{E_\phi}(x) dx = 1 - F_{E_\phi}(E_{Ref}(\phi)). \quad (6)$$

Это дополнительная функция CDF (CCDF) уровня плотности внеосевой э.и.и.м., рассчитанная в $E_{Ref}(\phi)$, а также функция угла отклонения от оси ϕ ; плотность э.и.и.м. в направлении прицеливания E_B ; местоположения земного терминала и спутника представлены суммой и разностью угла места и азимутального угла $\varepsilon_{SS\phi}^+$, $\varepsilon_{SS\phi}^-$ и $a_{SS\phi}^-$. Интуитивно очевидно, что путем уменьшения E_B можно уменьшить приведенную выше вероятность и полезно выразить эту вероятность так, чтобы параметр E_B был явным. Наконец, данное уравнение (3) может быть записано как $E_\phi(\phi) = E_B G(\theta_{BS\phi})$, где $G(\theta_{BS\phi})$ – нормированная диаграмма усиления антенны, то есть $G(0) = 1$. Вероятность в уравнении (6) можно описать следующим образом:

$$\Pr\{G(\theta_{BS\phi}) > E_{Ref}(\phi) / E_B\} = 1 - F_{G(\theta_{BS\phi})}(E_{Ref}(\phi) / E_B), \quad (7)$$

где $F_{G(\theta_{BS\phi})}$ – интегральная функция распределения $G(\theta_{BS\phi})$, а не функция E_B . Вероятность превышения уровня плотности э.и.и.м. эталонного уровня $E_{Ref}(\phi)$ соответствует приведенной выше; вместе с тем это не определяет уровень превышения плотности э.и.и.м. выше $E_{Ref}(\phi)$. Данный аспект может быть разрешен путем анализа вероятности того, что уровень плотности внеосевой э.и.и.м. превысит ($EIRP_{excess} \times E_{Ref}(\phi)$), где $EIRP_{excess} \geq 1$ является фактором масштаба. Используя это в уравнении (7), получаем следующее представление требуемой вероятности:

$$\begin{aligned} \Pr\{E_\phi(\phi) > (E_{Ref}(\phi) \times EIRP_{excess})\} &= \Pr\{G(\theta_{BS\phi}) > E_{Ref}(\phi) \times EIRP_{excess} / E_B\} \\ &= 1 - F_{G(\theta_{BS\phi})}(E_{Ref}(\phi) \times EIRP_{excess} / E_B). \end{aligned} \quad (8)$$

Вышеприведенная вероятность является интегральной функцией распределения $G(\theta_{BS\phi})$, рассчитанной в $(E_{Ref}(\phi) \times EIRP_{excess} / E_B)$.

Процедура расчета вероятности в уравнении (8) заключается в следующем:

Шаг 1: основными случайными величинами здесь являются компоненты ошибки наведения антенны ϕ_ε и ϕ_a , функции плотности распределения которых, для наглядности, приняты известными, согласно разделу 2.

Шаг 2: для известных местоположений земного терминала, спутника и внеосевого направления, сумма и разность угла места и азимутального угла $\varepsilon_{SS\phi}^+$, $\varepsilon_{SS\phi}^-$ и $a_{SS\phi}^-$ рассчитываются согласно разделу 3. Далее эти углы используются в уравнении (5), а результат подставляется в уравнение (4) для описания $\theta_{BS\phi}$ с помощью случайных величин ϕ_ε и ϕ_a . Функция плотности распределения $\theta_{BS\phi}$ может быть далее определена с помощью PDF величин ϕ_ε и ϕ_a . Используя это соотношение в уравнении (2), определяется функция плотности распределения $\theta_{BS\phi}$, которая далее используется для расчета CCDF случайной величины $G(\theta_{BS\phi})$.

Шаг 3: Наконец, желательная вероятность в уравнении (8) определяется по CCDF величины $G(\theta_{BS\phi})$, а E_B и $e.i.r.p.excess$ при этом служат параметрами.

5 Иллюстративная статистическая маска плотности э.и.и.м. для ограничения внеосевого излучения

Для ограничения внеосевого излучения в случае наличия ошибок наведения антенны, обусловленных движением, может использоваться верхняя граница вероятности того, что уровень плотности э.и.и.м. превысит эталонный уровень. Очевидно, однако, что вероятность, рассчитанная с помощью уравнения (8), зависит от местоположения земного терминала и спутника, а также угла отклонения от оси. Поскольку земной терминал может находиться в любом месте на поверхности Земли, весьма желательно ограничить внеосевые излучения, используя функцию, не зависящую от местоположения земного терминала и спутника. В идеальном случае полезно вывести верхнюю границу вероятности $\Pr\{E_\phi(\phi) > (E_{Ref}(\phi) \times EIRP_{excess})\}$ как простую функцию $P_{max}(EIRP_{excess})$, которая применима в любом месте на поверхности Земли и для всех углов отклонения от оси. Эта функция желательной вероятности $P_{max}(EIRP_{excess})$ ограничивает излучения с плотностью внеосевой э.и.и.м. и образует статистическую маску для уровня плотности э.и.и.м.

Для получения указанной выше статистической маски уровня плотности э.и.и.м. рассмотрим частный случай, при котором точки S и S_ϕ находятся на ГСО, а земной терминал помещается на экваторе и непосредственно под точкой S . Для такой конфигурации $\epsilon_S = 90^\circ$, $\epsilon_{S\phi} = (90^\circ - \phi)^\circ$, $a_S = 90^\circ$ и $a_{S\phi} = 90^\circ$ или 270° , из чего следует, что $\epsilon_{SS\phi}^+ = (180 - \phi)^\circ$, $\epsilon_{SS\phi}^- = \phi$ и $a_{SS\phi}^- = 0^\circ$ или 180° . Используя эти выражения в уравнении (5) и подставляя результат в уравнение (4), можно описать $\theta_{BS\phi}$ следующим образом:

$$\cos \theta_{BS\phi} = \cos(\phi - \phi_\epsilon) - (\cos(\phi - \phi_\epsilon) - \cos(\phi - \phi_\epsilon)) \times \sin^2 \frac{\phi_a}{2}. \quad (9)$$

CDF величины $G(\theta_{BS\phi})$, полученная с использованием вышеприведенной $\theta_{BS\phi}$, не будет функцией конкретных угла места и азимутального угла от земного терминала на спутник, вместе с тем эта CDF будет функцией угла отклонения от оси ϕ . Для выведения функции, применимой ко всем углам отклонения от оси, рассмотрим максимум вероятности в уравнении (8) по всем углам отклонения от оси. Полученная на основании уравнения (8) эта желательная максимальная вероятность описывается следующим образом:

$$P_{E_B} = (EIRP_{excess}) = \max_{\phi} \Pr \left\{ G(\theta_{BS\phi}) > (E_{Ref}(\phi) \times EIRP_{excess} / E_B) \right\}. \quad (10)$$

Вышеприведенная функция вероятности превышения не зависит от конкретного местоположения земного терминала или спутника либо конкретного угла отклонения от оси; следовательно, эта функция является подходящим кандидатом для использования в качестве иллюстративной маски плотности внеосевой э.и.и.м. $P_{max}(EIRP_{excess})$.

Для применения вышеизложенного подхода в целях ограничения излучений с плотностью внеосевой э.и.и.м. конкретной антенной системы следует определить нижеперечисленные параметры в качестве эксплуатационных ограничений: эталонный уровень плотности внеосевой э.и.и.м. $E_{Ref}(\phi)$ и максимальное значение вероятности того, что уровень плотности э.и.и.м. может превысить уровень $(E_{Ref}(\phi) \times EIRP_{excess})$ по всем углам отклонения от оси $P_{max}(EIRP_{excess})$, что является иллюстративной статистической маской уровня плотности внеосевой э.и.и.м. Для реальной антенной системы должно быть известно следующее: нормированная диаграмма направленности антенны, статистика ошибок наведения и местоположения земного терминала и предполагаемого для использования спутника. Задача заключается в установлении такой плотности э.и.и.м. в направлении прицеливания E_B антенной системы, чтобы выполнялись эксплуатационные ограничения в отношении уровня плотности внеосевой э.и.и.м. Эта задача решается путем расчета CCDF параметра $G(\theta_{BS\phi})$ как функции E_B согласно уравнению (8) и дальнейшего определения надлежащего значения E_B , при котором верхним ограничением этой CCDF было бы ограничение $P_{max}(EIRP_{excess})$ для всех значений ϕ и $e.i.r.p.excess$. В разделе 7 представлен пошагово иллюстративный метод использования функции вероятности в уравнении (10) в целях ограничения уровня плотности внеосевой э.и.и.м. реальной антенной системы.

Для вывода определенной иллюстративной статистической маски для уровня плотности э.и.и.м. рассмотрим следующий эталонный уровень плотности э.и.и.м.:

$$E_{Ref}(\varphi) (\text{дБВт}/40 \text{ кГц}) = \begin{cases} 25 - 25 \log(\varphi) & 2 \leq \varphi < 7 \\ 4 & 7 \leq \varphi < 9,2 \\ 28 - 25 \log(\varphi) & 9,2 \leq \varphi < 48 \\ -14 & 48 \leq \varphi \leq 180 \end{cases} \quad (11)$$

Это маска плотности внеосевой э.и.и.м., определенная в Рекомендации МСЭ-R S.728, которая объединена с требованием примечания 1 в этой Рекомендации. Рисунок 3 отображает правую часть уравнения (10) (без максимизации), $\text{Pr}\{G(\theta_{BS\varphi}) > (E_{Ref}(\varphi) \times \text{EIRP}_{excess} / E_B)\}$ как функцию φ для постоянных значений e.i.r.p._{excess} и E_B . Заметим, что, если e.i.r.p._{excess} изменяется, максимум этой вероятности будет приходиться на другое значение φ . На рисунке 4 показано это максимальное значение $P_{E_B}(\text{EIRP}_{excess})$ для параметров α и c функций плотности вероятности компонентов ошибки наведения антенны вследствие движения φ_e и φ_a , а также плотности э.и.и.м. в направлении прицеливания E_B . При этом в качестве исходных условий принято, что две указанные выше случайные величины имеют идентичное распределение и являются взаимно независимыми. Для диаграммы направленности антенны, заданной в уравнении (2), для применений в полосе 14 ГГц были выбраны следующие репрезентативные значения: $d = 0,51$ м, $n = 1$ и частота = 14,2 ГГц. Заметим, что для более высоких значений α функция PDF ошибки наведения антенны будет иметь более короткую асимптотическую часть и, следовательно, $P_{E_B}(\text{EIRP}_{excess})$ будет спадать быстрее. Кроме того, для меньших значений c функция PDF ошибки наведения антенны будет более узкой, результатом чего станет меньшая вероятность $P_{E_B}(\text{EIRP}_{excess})$. Очевидно, что кривые, приведенные на рисунке 4, зависят от E_B : чем меньше значения E_B , тем соответственно меньше значения $P_{E_B}(\text{EIRP}_{excess})$. Для кривых, показанных на этом рисунке, E_B устанавливается в свое максимальное значение, так что результирующая $P_{E_B}(\text{EIRP}_{excess})$ становится чуть ниже своего значения, соответствующего параметрам $\alpha = 1,5$, $c = 0,35^\circ$ и $E_B = 21,53$ (дБВт/40 кГц). В этом разделе подробно поясняется определение конкретных значений E_B , представленной на данном рисунке.

РИСУНОК 3

Правая часть уравнения (10) (исключая максимизацию) как функция угла отклонения от оси ϕ , для разных значений э.и.и.м. $_{excess}$ (дБ). Другие параметры: $\alpha = 1,5$, $c = 0,35^\circ$, $E_B = 21,53$ дБВт/40 кГц, $n = 1$ и частота = 14,2 ГГц

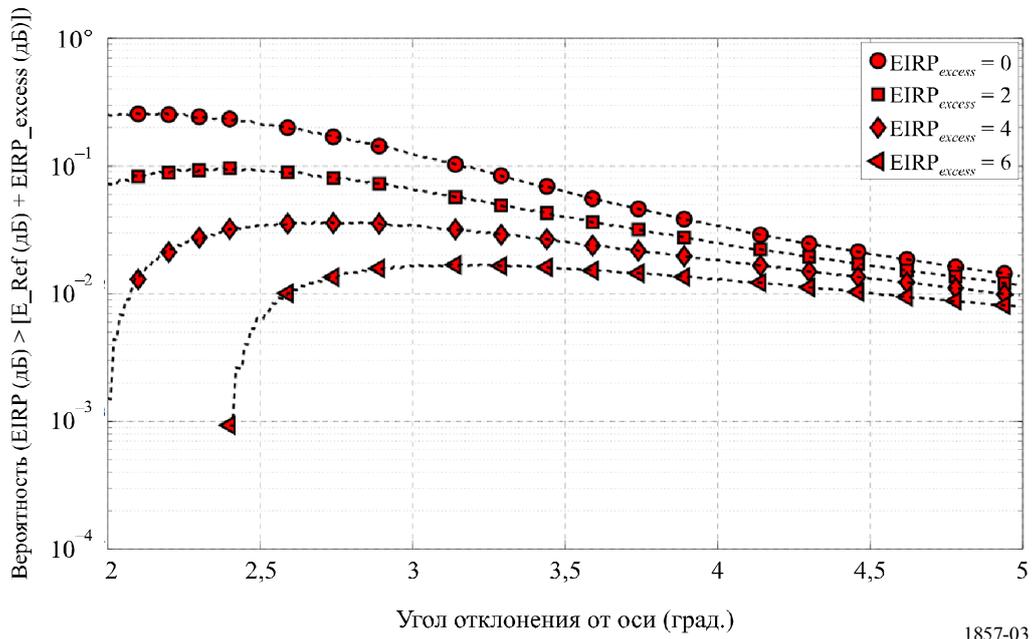
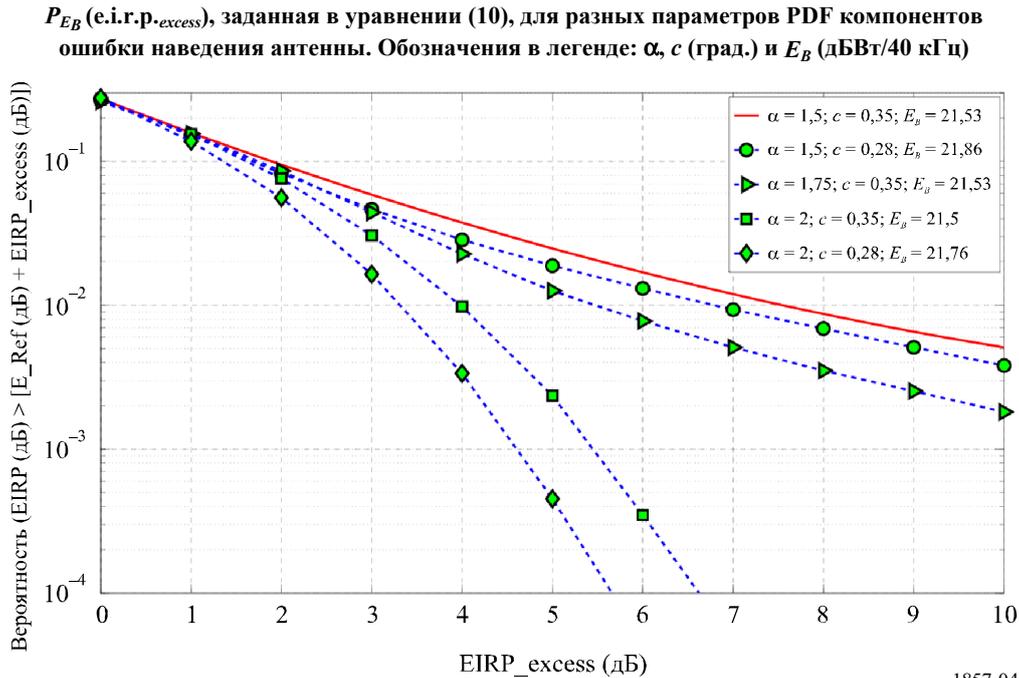


РИСУНОК 4



Любая кривая, показанная на рисунке 4, является подходящим кандидатом для использования в качестве иллюстративной статистической маски для плотности внеосевой э.и.и.м. В настоящем Приложении верхняя кривая на указанном рисунке, которая соответствует параметрам $\alpha = 1,5$, $c = 0,35^\circ$ и $E_B = 21,53$ (дБВт/40 кГц), выбрана в качестве иллюстративной статистической маски для плотности э.и.и.м. P_{max} ($EIRP_{excess}$). Эта кривая выбрана, так как ряд результатов измерений показывают, что эти значения параметров (α и c) являются характерными для типовых эксплуатационных топографических характеристик и скорости транспортного средства. Процесс определения значения E_B поясняется в разделе 6. Вышеупомянутая иллюстративная статистическая маска плотности внеосевой э.и.и.м. может быть аппроксимирована с помощью следующего выражения:

$$P_{max}(x) = \exp(0,016x^2 - 0,561x - 1,297) \quad 0 \leq x \leq 10, \quad (12)$$

где $x = e.i.g.p.excess$ (дБ). Для того чтобы антенная система соответствовала данному образцу маски, вероятность P_{E_B} ($e.i.g.p.excess$) этой антенной системы, рассчитанная согласно уравнению (10), должна быть меньше P_{max} ($EIRP_{excess}$), то есть:

$$\max_{E_B} P_{E_B}(EIRP_{excess}) \leq P_{max}(10 \times \log_{10}(EIRP_{excess})) \quad 1 \leq EIRP_{excess} \leq 10, \quad (13)$$

где максимум определяется по E_B . Как видно по кривым на рисунке 4, образцу маски P_{max} ($EIRP_{excess}$ (дБ)) могут соответствовать антенные системы с разными значениями параметров α и c при приемлемых уровнях E_B .

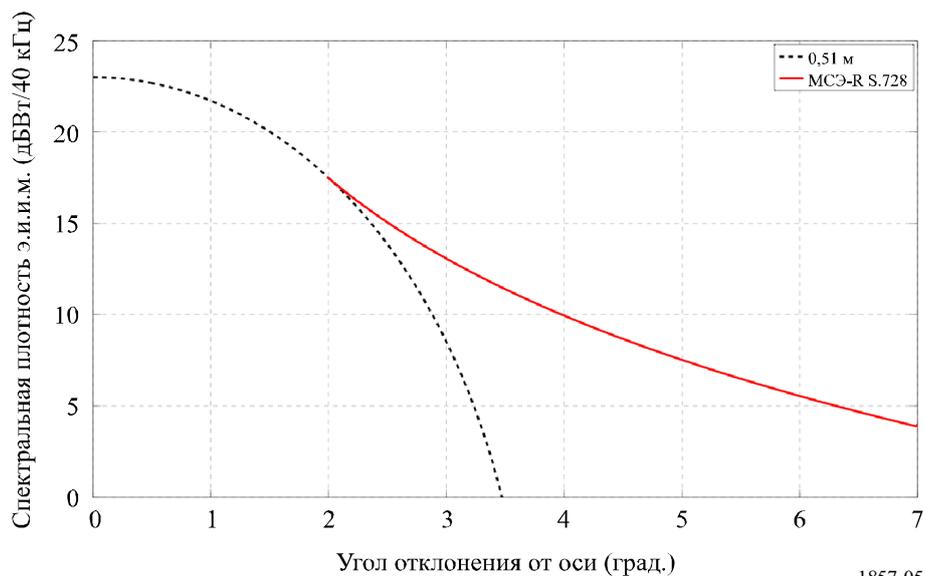
6 Расчет плотности э.и.и.м. в направлении прицеливания

Как видно из вывода уравнений в предыдущем разделе, плотность э.и.и.м. в направлении прицеливания E_B играет ключевую роль при определении характеристик терминалов, установленных на транспортном средстве. Заметим, что функция вероятности в уравнении (10) налагает ограничение на плотность э.и.и.м. в направлении прицеливания. Кроме того, увеличение плотности э.и.и.м. в направлении прицеливания приводит к увеличению помехи в направлении соседних спутников, и в

Приложении 2 представлен детальный анализ помех от этих терминалов. Желательный уровень плотности э.и.и.м. в направлении прицеливания должен удовлетворять двум конкурирующим требованиям: необходимость передавать достаточную мощность для поддержки приемлемой скорости передачи данных и обеспечение допустимости возникающих в результате этих передач помех для операторов соседних спутников. Значение E_B , необходимое для передачи с приемлемой скоростью передачи данных в земных станциях, установленных на транспортном средстве, может быть определено путем сравнения его значения с соответствующим значением для статического земного терминала. На рисунке 5 показана маска плотности э.и.и.м. для статических земных терминалов, установленная в Рекомендации МСЭ-R S.728 и описанная в уравнении (11). На этом рисунке также показаны максимальные значения плотности внеосевой э.и.и.м. в направлении прицеливания, соответствующие антенне с диаметром апертуры $d = 0,51$ м. Этот уровень плотности внеосевой э.и.и.м. в направлении прицеливания для такой антенны достигается путем постепенного увеличения E_B до тех пор, пока результирующая диаграмма плотности внеосевой э.и.и.м. в направлении прицеливания не окажется непосредственно под маской МСЭ-R S.728. Очевидно, что значение E_B , которое соответствует маске, увеличивается вместе с увеличением диаметра апертуры антенны, и для $d = 0,51$ м параметр $E_B = 23$ дБ(Вт/40 кГц).

РИСУНОК 5

Максимальное значение плотности э.и.и.м. в направлении прицеливания в соответствии с Рекомендацией МСЭ-R S.728. Параметры: $d = 0,51$ м, $n = 1$, частота = 14,2 ГГц



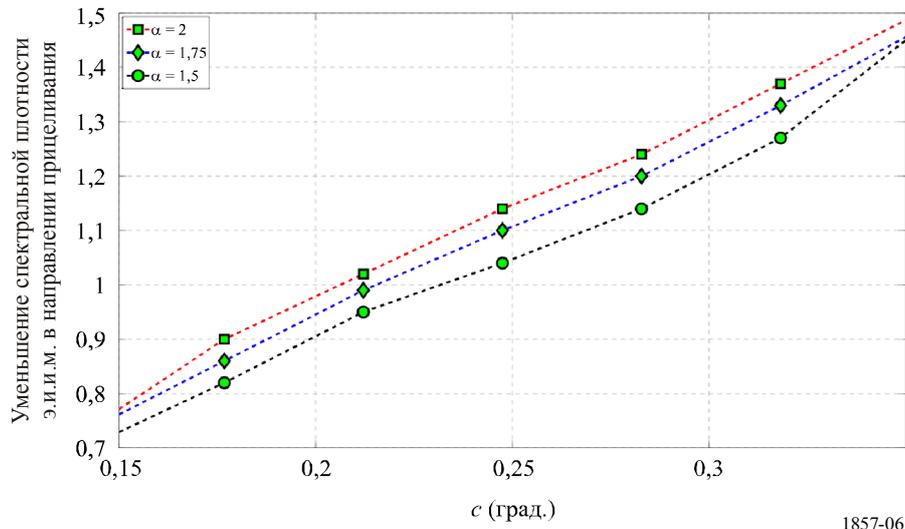
1857-05

Результаты, представленные на рисунке 5, отражают случай отсутствия ошибок наведения антенны. В случае наличия ошибок наведения антенны плотность э.и.и.м. в направлении прицеливания должна быть уменьшена вследствие колебаний диаграммы плотности внеосевой э.и.и.м. В предыдущем разделе в уравнении (12) была определена иллюстративная статистическая маска плотности э.и.и.м. для конкретной антенной системы. Желательное значение E_B , которое соответствует этой статистической маске, определяется путем увеличения ее значения, до тех пор пока $P_{E_B}(e.i.r.\text{-}excess)$ не достигнет своего максимального значения, определенного в правой части уравнения (13).

На рисунке 6 показано уменьшение плотности э.и.и.м. в направлении прицеливания, требуемое для достижения соответствия образцу маски, определенной в уравнении (12), с тем чтобы могли быть компенсированы ошибки наведения антенны. Для постоянных значений α , более высокие значения c соответствуют более грубым ошибкам наведения, результатом чего является большее уменьшение плотности э.и.и.м. в направлении прицеливания. Как следует из данного рисунка, для учета ошибок наведения антенны потребуется небольшое уменьшение плотности э.и.и.м. в направлении прицеливания, например, если $\alpha = 1,5$ и $c = 0,2^\circ$, это уменьшение составит 0,9 дБ, что повлечет за собой увеличение примерно на 1,45 дБ для $\alpha = 1,5$ и $c = 0,35^\circ$.

РИСУНОК 6

Уменьшение плотности э.и.и.м. в направлении прицеливания, необходимое для достижения соответствия иллюстративной статистической маске P_{max} ($EIRP_{excess}$) в уравнении (12)



1857-06

7 Иллюстративный метод определения плотности э.и.и.м. в направлении прицеливания для обеспечения соответствия образцу статистической маски плотности э.и.и.м.

В данном разделе представлен метод определения соответствия иллюстративной статистической маске плотности э.и.и.м., определенной в уравнении (12) в разделе 5. В частности, этот метод показывает, как рассчитать максимальное значение плотности э.и.и.м. в направлении прицеливания антенной системы для данного множества ошибок по углу места и азимутальному углу. Иллюстративный метод описан ниже.

7.1 Исходные данные для расчетов

- Репрезентативные выборочные значения ошибок по углу места и азимутальному углу $\phi_\varepsilon(m)$ и $\phi_a(m)$, $m = 1, 2, \dots, M$, где M – размер выборки. Эти значения должны соответствовать результатам измерений в реальном времени или данным, собранным на выборочных трассах, которые имеют характеристики, аналогичные тем, где, как ожидается, будет эксплуатироваться данный терминал. Предполагается, что размер выборки M достаточно большой, и статистические количественные значения, рассчитанные с применением этих выборок, являются достаточно точными оценками желательных статистических значений.
- Угол места и азимутальный угол на требуемый спутник S , обозначенные, соответственно, как ε_S и a_S . Угол места и азимутальный угол в направлении S_ϕ обозначенные, соответственно, как ε_{S_ϕ} и a_{S_ϕ} . На рисунке 2 показана релятивная геометрия S и S_ϕ . Здесь S_ϕ может находиться в любой точке ГСО, а ϕ является переменной.
- Нормированная диаграмма направленности антенны $G(\phi)$, где ϕ – угол отклонения от оси и для наглядности принято, что диаграмма направленности антенны является симметричной относительно своего направления прицеливания.
- Статистическая маска плотности внеосевой э.и.и.м., определенная в уравнении (12).

7.2 Оценка интегральной функции плотности $G(\theta_{BS\varphi})$

е) Используя данные пп. а) и б), выше, рассчитаем сумму углов места в направлении прицеливания и в направлении S_φ , $\varepsilon_{BS\varphi}^+$; и разность углов места и азимутальных углов в этих направлениях $\varepsilon_{BS\varphi}^-$ и $a_{BS\varphi}^-$. Используя уравнение (5), эти значения рассчитывается следующим образом:

$$\begin{aligned}\varepsilon_{BS\varphi}^-(m) &= (\varepsilon_S - \varepsilon_{S_\varphi} - \phi_\varepsilon(m)) \\ \varepsilon_{BS\varphi}^+(m) &= (\varepsilon_S + \varepsilon_{S_\varphi} - \phi_\varepsilon(m)) \\ a_{BS\varphi}^-(m) &= (a_S - a_{S_\varphi} - \phi_a(m)),\end{aligned}$$

где явно показана зависимость от индекса m выборки. Заметим, что $\varepsilon_{BS\varphi}^-(m)$, $\varepsilon_{BS\varphi}^+(m)$ и $a_{BS\varphi}^-(m)$ являются функциями угла отклонения от оси φ .

ф) Подставим полученные выше значения в уравнение (4) для вычисления $\theta_{BS\varphi}(m)$ – угла между направлением прицеливания и направлением S_φ . Из уравнения (4):

$$\theta_{BS\varphi}(m) = \cos^{-1} \left(\cos \varepsilon_{BS\varphi}^-(m) - \left(\cos \varepsilon_{BS\varphi}^+(m) + \cos \varepsilon_{BS\varphi}^-(m) \right) \times \sin^2 \frac{a_{BS\varphi}^-(m)}{2} \right).$$

г) Используя диаграмму направленности антенны, указанную в п. с), и $\theta_{BS\varphi}(m)$, рассчитанную выше, определим усиление антенны в направлении S_φ , $G(\theta_{BS\varphi}(m))$. Заметим, что $G(\theta_{BS\varphi}(m))$ может рассматриваться как случайная величина с выборками M и является функцией угла отклонения от оси φ .

h) оценим интегральную функцию распределения $G(\theta_{BS\varphi})$, $F_{G(\theta_{BS\varphi})}$, используя выборки M , рассчитанные в п. г). Заметим, что поскольку $F_{G(\theta_{BS\varphi})}$ является функцией φ , CDF должна рассчитываться для каждого значения переменной φ .

7.3 Расчет максимального значения E_B , соответствующего образцу статистической маски

и) Выберем соответствующие значения $\text{EIRP}_{\text{excess}}$, $1 \leq \text{EIRP}_{\text{excess}} \leq 10$ и E_B , $(E_{B,\text{max}} - \Delta E_B) \leq E_B \leq E_{B,\text{max}}$ и, используя оценку CDF, выполненную в п. h), определим вероятность в уравнении (8) для каждого значения φ . Здесь, $E_{B,\text{max}}$ – максимальная плотность э.и.и.м. в направлении прицеливания в отсутствие ошибок наведения антенны, а ΔE_B служит для учета уменьшения плотности э.и.и.м. в направлении прицеливания вследствие ошибок наведения антенны; в иллюстративных целях установим ΔE_B равной $\Delta E_{B,\text{max}}/2$.

Заметим, что уравнение (8) должно быть определено для всех представляющих интерес значений $\text{EIRP}_{\text{excess}}$ и E_B ; вместе с тем если известно, что уменьшение э.и.и.м. в направлении прицеливания является небольшим, вычисления могут быть упрощены путем ограничения диапазона значений E_B . На рисунке 6 показано уменьшение значения E_B для параметров конкретной системы, рассматриваемой в разделе 6. Например, поскольку уменьшение невелико, значение $\Delta E_B = \Delta E_{B,\text{max}}/3$ является подходящим для соответствующих параметров системы.

ж) Для постоянных значений $EIRP_{excess}$ и E_B определим $P_{E_B}(e.i.r.p.excess)$, используя выражение, данное в уравнении (10), которое является максимальным значением вероятности, рассчитанным в п. и) с использованием φ как переменной. Ниже представлено выражение для $P_{E_B}(e.i.r.p.excess)$:

$$P_{E_B} = (EIRP_{excess}) = \max_{\varphi} \Pr \{G(\theta_{BS\varphi}) > (E_{Ref}(\varphi) \times EIRP_{excess} / E_B)\}.$$

Отметим, что $P_{E_B}(e.i.r.p.excess)$ является неубывающей функцией E_B , если она рассматривается как функция E_B для постоянных значений $EIRP_{excess}$.

к) Наконец, определим максимальное значение E_B , при котором $P_{E_B}(e.i.r.p.excess)$ меньше образца маски в уравнении (12) для всех значений в представляющем интерес диапазоне $EIRP_{excess}$. Желательное значение E_B удовлетворяет условиям уравнения (13) и описывается следующим образом:

$$\max_{E_B} P_{E_B}(EIRP_{excess}) \leq P(10 \times \log_{10}(EIRP_{excess})) \quad 1 \leq EIRP_{excess} \leq 10.$$

Заметим, что представленный выше метод имеет исключительно иллюстративное назначение и не должен толковаться как единственный метод расчета значения E_B .

Справочные документы

- CHEN, C.-C. and GARDNER C.S., [March 1989] Impact of Random Pointing and Tracking Errors on the Design of Coherent and Incoherent Optical Intersatellite Communication Links, *IEEE Trans. Comm.* Vol. **37**, **3**, p. 252–260.
- CORRELL, C., [1996] A Mathematical Model Describing the Effects of Pointing and Tracking Errors Due to "Mechanical Noise" in Coherent Optical Intersatellite Links, *Inter. J. Sat. Comm.* Vol. **14**, p. 37–51.
- MARAL, G. and BOUSQUET M., [2000] Satellite Communications Systems: Systems, Techniques and Technology, John Wiley & Sons.
- SAMORODNITSKY, G. and TAQQU M.S., [1994] Stable Non-Gaussian Random Processes: Stochastic Models with Infinite Variance. Chapman & Hall/CRC.
- SHAO, M. and NIKIAS C.L., [July 1993] Signal Processing with Fractional Lower Order Moments: Stable Processes and Their Applications. *Proc. IEEE*, Vol. **81**, **7**, p. 986–1010.

Приложение 2

Методика оценки уровней помех, возникающих в результате колебаний внеосевой э.и.и.м. земных станций, вызываемых ошибками наведения, которые являются следствием движения платформы, установленной на транспортном средстве

1 Введение

Уровень плотности внеосевой э.и.и.м. от терминалов, установленных на платформах на транспортных средствах, изменяется во времени и, следовательно, вызывает изменяющийся во времени сигнал помехи в направлении соседних спутников, находящихся на геостационарной орбите. В данном Приложении представлена методика анализа и определения количественных значений переменных во времени помех, которые возникают от земных станций, установленных на транспортных средствах. Воздействие помех от изменяющихся во времени источников рассматривается в Рекомендации МСЭ-R S.1323; в этой Рекомендации также установлено максимальное приемлемое время, допускаемое для данных уровней кратковременных помех. Данное Приложение отвечает руководящим принципам, введенным в Рекомендации МСЭ-R S.1323, и в нем поясняется методика анализа помех, возникающих в результате изменяющихся во времени ошибок наведения антенн терминалов, установленных на транспортных средствах. Представленная методика будет полезна при определении соответствующего уровня плотности э.и.и.м. в направлении прицеливания этих терминалов, при котором они соответствуют допускам на помехи, создаваемые другим спутниковым системам, и соответствуют различным требуемым рабочим характеристикам этих систем.

2 Критерии оценки помех

Характеристики системы ФСС критическим образом зависят от помех, принимаемых ими от других систем. В Рекомендации МСЭ-R S.1432 содержится сводная информация по помехам, которые рассматриваются в других Рекомендациях МСЭ-R. В основе критериев помех, используемых в этих Рекомендациях МСЭ-R, лежит объем помех, который может быть допустим в течение длительного периода времени, а также в течение кратковременного периода. Первый критерий известен как долговременный критерий, поскольку помехи усредняются в течение достаточно продолжительного периода времени. Второй критерий определяет объем помех в течение кратких периодов времени; помехи, действующие в течение таких интервалов, как правило, изменяются во времени и, следовательно, обычно представляются распределением вероятности.

В Рекомендации МСЭ-R S.1323 рассматриваются воздействия изменяющихся во времени помех и устанавливаются максимальные допустимые уровни помех от разных источников. Вместе с тем в этой Рекомендации не определяется конкретное разделение неготовности линии для сетей ФСС вследствие изменяющихся во времени помех, создаваемых VMES ГСО. Допустимое время неготовности линии вследствие помех от VMES ГСО является лишь образцом значения. Данная методика обладает гибкостью для использования любого разделения, которое может быть согласовано между администрациями или должно быть рассмотрено в какой-либо будущей Рекомендации МСЭ-R. Основные исходные условия заключаются в том, что спутниковая линия разработана с достаточным запасом на линию для учета ухудшения условий распространения, таких как замирание сигнала в дожде, колебаний шума приемника и воздействия долговременных помех от других спутниковых сетей. Для учета влияния этих ухудшений требуемые рабочие характеристики спутниковой линии приводятся в значениях нарушения – коэффициент ошибок по битам или отношение мощности "несущая-шум" (C/N). Например, для данного множества значений отношения (C/N) и соответствующих пар допуска на время нарушения $\{(C/N)_i, p_i \%, i = 1, 2, \dots, I\}$, отношение (C/N) должно быть меньше $(C/N)_i$ только для $p_i \%$ времени (в любом месяце).

Согласно Рекомендации МСЭ-R S.1323 воздействие условий распространения следует учитывать для не более чем 90% времени неготовности линии. Следовательно, вышеприведенное утверждение может быть изменено следующим образом: отношение (C/N), рассчитанное в отсутствие

изменяющихся во времени помех, должно быть меньше $(C/N)_i$ для не больше чем $p_i\% \times 90\%$ времени. Остальные 10% допуска на время неготовности линии относятся на дополнительные ухудшения вследствие изменяющихся во времени помех, которые вызываются излучениями земных и космических станций всех других спутниковых сетей, работающих в той же полосе частот. Таким образом, общее отношение (C/N) , рассчитанное при наличии воздействия условий распространения и изменяющихся во времени помех, должно быть меньше $(C/N)_i$ только для $p_i\%$ времени, в соответствии с требованиями.

В настоящем документе рассматривается увеличение уровня помех в направлении соседних спутниковых систем вследствие изменяющихся во времени ошибок наведения антенны. Это увеличение уровня помех является увеличением относительно терминала, имеющего точно такие же характеристики, но работающего в стационарных условиях и в отсутствие ошибок наведения антенны. В качестве исходного условия принимается, что этот случай статического терминала соответствует маске излучения внеосевой э.и.и.м., установленной в Рекомендации МСЭ-R S.728, а также удовлетворяет многочисленным требованиям, установленным в соответствующих Рекомендациях. Увеличение уровня долговременных помех может быть определено путем усреднения помехи, обусловленной изменяющейся во времени ошибкой наведения антенны за период T_{avg} и сравнения полученного результата с его соответствующим значением статического случая. Параметр долговременной помехи T_{avg} должен представлять достаточно длительный период, с тем чтобы были учтены все репрезентативные отклонения изменяющегося во времени сигнала помех. Для этого случая уровень помех может контролироваться по плотности э.и.и.м. в направлении прицеливания терминала. Подробно эта методика описана в разделе 4.

Для обеспечения целевых кратковременных характеристик может использоваться методика, представленная в Рекомендации МСЭ-R S.1323. Однако следует отметить, что эта Рекомендация была составлена специально для случая, когда изменяющиеся во времени помехи создаются системами НГСО. Это подчеркивается в Примечании 1 этой Рекомендации, в котором указано, что отнесение 10% времени на отказы линии, обусловленные источниками помех, которые указаны выше, не применимо к случаю помех между системами ФСС ГСО. Следовательно, поскольку в настоящем документе рассматриваются помехи, создаваемые системами ФСС ГСО, допуск на время, относимый на отказы линии из-за изменяющихся во времени помех, будет представлен параметром $T_{allow}\%$, а не значением 10%, принятым в Рекомендации МСЭ-R S.1323. Целью данного документа является оценка воздействия изменяющихся во времени помех относительно статического случая, который включает влияние условий распространения и помех в отсутствие изменяющихся во времени ошибок наведения антенны.

Следовательно, в качестве эталонного случая для оценки воздействия изменяющихся во времени помех принимается статический случай. Заметим, что соответствующим эталонным случаем в Рекомендации МСЭ-R S.1323 является случай ухудшения вследствие воздействия только условий распространения. Отсюда требуемые рабочие характеристики таковы, что отказы линии связи в статическом случае относятся на не более чем $(100 - T_{allow})\%$ допуска по времени. Используя приведенные ранее выражения, отношение (C/N) , рассчитанное с учетом воздействия условий распространения и помех в статическом случае, не должно превышать $p_i\% \times (100 - T_{allow})\%$ времени. Далее, общее отношение (C/N) , рассчитанное для случая наличия изменяющихся во времени ошибок наведения антенны и с учетом условий распространения, меньше $(C/N)_i$ для $p_i\%$ времени, в соответствии с требованиями. Как и в случае долговременных помех, плотность э.и.и.м. в направлении прицеливания антенны может контролировать отказы линии; этот аспект подробно рассматривается в разделе 4.

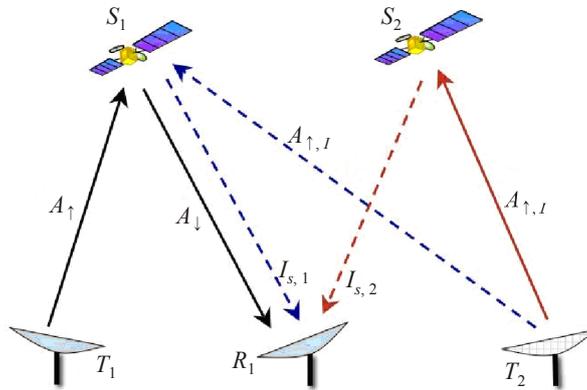
3 Эталонная база для анализа помех

В данном разделе представлена эталонная база для оценки помех и приведен перечень параметров и обозначений, используемых в последующих уравнениях.

На рисунке 7 показаны полезная и мешающая спутниковые сети. Полезный спутник обозначен как S_1 , а его передающие и приемные терминалы обозначены как T_1 и R_1 , соответственно. Мешающий терминал T_2 , его предполагаемый для использования спутник – S_2 . Подвергающийся воздействию помех приемник R_1 принимает сигнал от обоих спутников, S_1 и S_2 , как показано на рисунке 7.

РИСУНОК 7

Полезная и мешающая спутниковые сети. Терминалы T_1 , R_1 и S_1 находятся в полезной сети; терминал T_2 и спутник S_2 находятся в мешающей сети



1857-07

Ниже приведен перечень параметров и их обозначений, принятых в настоящей Рекомендации.

- φ : угол отклонения от оси в направлении от T_2 к S_1 в отсутствие ошибок наведения антенны;
- θ : угол отклонения от оси в направлении от R_1 к S_2 ;
- A_{\uparrow} : замирание в дожде в линии вверх в направлении от T_1 к S_1 ;
- A_{\downarrow} : замирание в дожде в линии вниз в направлении от S_1 к R_1 ;
- $A_{\uparrow,I}$: замирание в дожде в линии вверх в направлении от источника помех T_2 к S_1 или S_2
- B_s : плотность э.и.и.м. (Вт/Гц) в направлении прицеливания в статическом случае, которая является значением в отсутствие изменяющихся во времени ошибок наведения антенны в T_2 . Отсюда направление прицеливания – это направление, в котором усиление антенны является максимальным;
- B_i : плотность э.и.и.м. (Вт/Гц) в направлении прицеливания в T_2 при наличии изменяющихся во времени ошибок наведения антенны. Заметим, что этот параметр соответствует E_B в уравнении (3);
- ΔB : уменьшение плотности э.и.и.м. в направлении прицеливания, $\Delta B = B_s/B_i$;
- $(C/N)_{cs}$: отношение мощности несущая-шум в R_1 в условиях ясного неба. C – полезная мощность несущей, принимаемая в R_1 от T_1 ;
- $(C/N)_s$: отношение (C/N) в R_1 для статического случая, в котором учитываются замирание в дожде и помехи от T_2 и отсутствуют изменяющиеся во времени ошибки наведения антенны;
- $(C/N)_i$: отношение (C/N) в R_1 с учетом замирания в дожде и помех от T_2 вследствие изменяющихся во времени ошибок наведения антенны;
- $G_1(\theta)$: нормированный коэффициент направленности антенны R_1 во внеосевом направлении θ ($G_1(0) = 1$);
- $G_2(\varphi)$: нормированный коэффициент направленности антенны T_2 во внеосевом направлении φ ($G_2(0) = 1$). Отметим, что этот параметр соответствует $G(\varphi)$ в уравнении (2) в Приложении 1;
- $G_{2,i}(\varphi)$: нормированный коэффициент направленности антенны T_2 в направлении φ при наличии изменяющихся во времени ошибок наведения антенны;

- G_{S1} : коэффициент усиления при малом сигнале на S_1 . (э.и.и.м. на S_1 в направлении R_1) = (плотность потока мощности от T_2) $\times \frac{\lambda^2}{4\pi} \times G_{S1}$, λ длина волны в линии вверх;
- G_{S2} : коэффициент усиления при малом сигнале на S_2 . (э.и.и.м. на S_2 в направлении R_1) = (плотность потока мощности от T_2) $\times \frac{\lambda^2}{4\pi} \times G_{S2}$, λ длина волны в линии вверх;
- $(G/T)_1$: отношение коэффициента усиления приемной антенны к шумовой температуре в R_1 ;
- $(G/T)_{S1}$: отношение коэффициента усиления приемной антенны к шумовой температуре в S_1 , когда направлением приема является направление к T_2 ;
- $(G/T)_{S2}$: отношение коэффициента усиления приемной антенны к шумовой температуре в S_2 , когда направлением приема является направление к T_2 ;
- $I_{s,1}$: мощность помехи от T_2 , принимаемая в R_1 через S_1 в отсутствие изменяющихся во времени ошибок наведения антенны;
- $I_{s,2}$: мощность помехи от T_2 , принимаемая в R_1 через S_2 в отсутствие изменяющихся во времени ошибок наведения антенны;
- $I_{t,1}$: мощность помехи от T_2 , принимаемая в R_1 через S_1 при наличии изменяющихся во времени ошибок наведения антенны;
- $I_{t,2}$: мощность помехи от T_2 , принимаемая в R_1 через S_2 при наличии изменяющихся во времени ошибок наведения антенны;
- k : постоянная Больцмана, $1,38 \times 10^{-23}$ Дж/К;
- $\log(X)$: $\log_{10}(X)$;
- L_u : потери в линии вверх (ясное небо) от T_2 к S_1 или S_2 ;
- L_d : потери в линии вниз (ясное небо) от S_1 или S_2 к R_1 ;
- N_{\downarrow} : мощность шума приемника в R_1 , соответствующая шумовой температуре T_{\downarrow} ;
- $N_{\uparrow,1}$: мощность шума от S_1 , принимаемая в R_1 ;
- $N_{\uparrow,2}$: мощность шума от S_2 , принимаемая в R_1 ;
- N_r : шум дождя (неба) в приемнике R_1 , обусловленный температурой дождя T_r (линия вниз);
- $p_X(x)$: функция плотности вероятности (PDF) X ;
- $P_X(x) = \Pr\{X \leq x\}$: интегральная функция распределения (CDF) X ;
- \bar{X} : превышение переменной в дБ, $10 \log_{10} X$;
- $\langle X \rangle$: среднее значение случайной величины X ;
- Z_s : $Z_s = \frac{(C/N)_{cs}}{(C/N)_s}$, ухудшение отношения (C/N) вследствие влияния замирания в дожде и статической помехи от терминала T_2 ;
- Z_t : $Z_t = \frac{(C/N)_{cs}}{(C/N)_t}$, ухудшение отношения (C/N) вследствие влияния замирания в дожде и изменяющейся во времени помехи от терминала T_2 .

4 Воздействие кратковременной помехи: ухудшение отношения (C/N)

В данном разделе выполняется расчет ухудшения отношения (C/N) в R_1 , обусловленного замиранием в дожде и помехами от T_2 . Рассматриваемое здесь замирание в дожде будет вносить статистическую изменчивость значения принимаемого отношения (C/N)². Во-первых, рассматриваются замирание в дожде и помехи от T_2 в отсутствие изменяющихся во времени ошибок наведения антенны для расчета CDF параметра Z_s , который является ухудшением отношения (C/N) в R_1 . Это рассматривалось в п. 4.1. Далее, вводятся меняющиеся во времени ошибки наведения антенны в T_2 и определяется CDF результирующего ухудшения отношения (C/N) в R_1 , которая обозначается как Z_t . Далее эти функции CDF используются для расчета относительного увеличения значения неготовности линии вследствие изменяющихся во времени ошибок наведения антенны. Это рассматривалось в п. 4.2.

Для осуществляемого в данном разделе анализа были приняты следующие исходные условия: подвергающийся воздействию помех приемник получает помехи только от одного соседнего спутника; если сигналы помех от других соседних спутников не являются пренебрежимо малыми, их следует принимать в расчет аналогичным образом.

4.1 Статический случай: терминал T_2 , осуществляющий передачу в отсутствие изменяющихся во времени ошибок наведения антенны

Отношение мощности несущая-шум в приемнике R_1 в условиях ясного неба для спутниковой сети, представленное на рисунке 1, описывается следующим образом:

$$(C/N)_{CS} = \frac{C}{N_{\downarrow} + N_{\uparrow} + I_{S,1} + I_{S,2} + N_{\uparrow,2}} \quad (14)$$

Здесь параметры помехи $I_{S,1}$ и $I_{S,2}$ обусловлены передачей T_2 с плотностью э.и.и.м. в направлении прицеливания B_s в статическом случае, который характеризуется отсутствием изменяющихся во времени ошибок наведения антенны. Если T_2 является терминалом с малой апертурой, можно принять, что B_s соответствует маске внеосевой э.и.и.м., приведенной в Рекомендации МСЭ-R S.728 и соответствующих рекомендациях относительно помех. Заметим, что в уравнении (14) член $N_{\uparrow} + I_{S,1}$ из S_1 , а $I_{S,2} + N_{\uparrow,2}$ – из S_2 . При наличии в линии вверх и линии вниз замирания в дожде полезного сигнала отношение (C/N) имеет вид:

$$(C/N)_S = \frac{C/A_{\uparrow} A_{\downarrow}}{N_{\downarrow} + N_{\uparrow}/A_{\downarrow} + N_r (1 - 1/A_{\downarrow}) + (I_{S,1} + I_{S,2})/(A_{\uparrow,I} A_{\downarrow}) N_{\uparrow,2}/A_{\downarrow}} \quad (15)$$

Здесь принято, что спутники S_1 и S_2 расположены близко один от другого, так что компоненты замирания в дожде в линиях вверх к этим спутникам от T_2 приблизительно одинаковые. Кроме того, принято, что компоненты замирания в дожде в линиях вниз от S_1 и S_2 к R_1 одинаковые. Если S_1 и S_2 расположены не на близком расстоянии один от другого, это допущение может быть не действительным; в таких случаях следует принимать в расчет корреляцию между соответствующими компонентами замирания в дожде. Заметим, что член уравнения $N_r (1 - 1/A_{\downarrow})$, ($A_{\downarrow} \geq 1$) в номинаторе означает дополнительный шум приемника, обусловленный температурой дождя T_r .

Исходя из этого ухудшение отношения (C/N) при наличии замирания в дожде в линии вверх и линии вниз может быть описано следующим образом:

$$Z_s = (A_{\uparrow} / A_{\uparrow,I}) \times (A_{\downarrow} A_{\uparrow,I} d_1 + A_{\uparrow,I} d_2 + d_3), \quad (16)$$

² Спутниковые линии, как правило, проектируются с запасами на замирание в линии, с тем чтобы компенсировать такие ухудшения.

где переменные линии $c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, d_1, d_2$ и d_3 определяются следующим образом:

$$\begin{aligned}
 c_1 &= \frac{I_{s,2}}{I_{s,1}}; c_2 = \frac{I_{s,1}}{N_{\uparrow}}; c_3 = \frac{N_{\uparrow}}{N_{\downarrow}}; c_4 = \frac{N_r}{N_{\downarrow}}; c_5 = \frac{N_{\uparrow,2}}{I_{s,2}} \\
 d_1 &= \frac{1 + c_4}{1 + c_1 c_2 c_3 (1 + c_5) + c_2 c_3 + c_3} \\
 d_2 &= \frac{c_1 c_2 c_3 c_5 + c_3 - c_4}{1 + c_1 c_2 c_3 (1 + c_5) + c_2 c_3 + c_3} \\
 d_3 &= \frac{c_1 c_2 c_3 + c_2 c_3}{1 + c_1 c_2 c_3 (1 + c_5) + c_2 c_3 + c_3}.
 \end{aligned} \tag{17}$$

Эти переменные могут быть определены для данного множества переменных линии. Более определенно:

$$\begin{aligned}
 c_1 &= \frac{G_2(0)}{G_2(\varphi)} \frac{G_{S2}}{G_{S2}} \frac{G_1(\theta)}{G_1(0)} \\
 c_2 &= \frac{B_s G_2(\varphi) (G/T)_{S1}}{k L_u} \\
 c_3 &= \frac{(G/T)_1 G_{S1}}{(G/T)_{S1} L_d} \\
 c_4 &= \frac{T_r}{T_{\downarrow}} \\
 c_5 &= \frac{k L_u}{B_s G_2(0) (G/T)_{S2}},
 \end{aligned} \tag{18}$$

где в целях упрощения этого выражения принято, что в отсутствие замирания в дожде потери на распространение в линиях вверх от T_2 к спутнику S_1 и S_2 одинаковые. Аналогичное допущение действует для потерь на распространение в линиях вниз от спутников S_1 и S_2 к R_1 .

Взяв логарифм Z_s в уравнении (16), получаем:

$$\bar{Z}_s = \bar{A}_{\uparrow} - \bar{A}_{\uparrow,l} + 10 \log \left(10^{(\bar{A}_{\downarrow} + \bar{A}_{\uparrow,l})/10} d_1 + 10^{(\bar{A}_{\uparrow,l})/10} d_2 + d_3 \right). \tag{19}$$

В аналитическом отношении проще определить интегральную функцию распределения \bar{Z}_s для частного случая, когда компонент замирания в дожде в линии вверх $\bar{A}_{\uparrow,l}$ игнорируется, то есть $\bar{A}_{\uparrow,l} = 0$. Заметим, что этот конкретный случай рассматривается исключительно по причине аналитической простоты; в более общем случае компонент замирания в дожде не должен игнорироваться. В данном случае CDF ухудшения может быть описана следующим образом:

$$P_s(\bar{z}) = \Pr(\bar{Z}_s \leq \bar{z}) = \iint_{R_z} p_{A_{\downarrow}}^-(u) p_{A_{\uparrow}}^-(v) dv du,$$

где область интеграла такова, что для $\bar{A}_{\downarrow}, \bar{A}_{\uparrow} \in R_z$ значение \bar{Z}_s удовлетворяет условию $\bar{Z}_s \leq \bar{z}$. В качестве исходного условия в вышеприведенном принято, что компоненты замирания в дожде \bar{A}_{\downarrow} and \bar{A}_{\uparrow} являются независимыми один от другого.

Поскольку \bar{Z}_s является монотонно возрастающей функцией $\bar{A}_\downarrow (\geq 0)$ и $\bar{A}_\uparrow (\geq 0)$, область $R_{\bar{z}}$ может быть представлена как область, ограниченная $0 \leq \bar{A}_\uparrow \leq \bar{z} - 10 \log(10^{\bar{A}_\downarrow/10} d_1 + d_2 + d_3)$ и $0 \leq \bar{A}_\downarrow \leq 10 \log((10^{\bar{z}/10} - d_2 - d_3)/d_1)$.

Вышеприведенный интеграл далее определяется как:

$$\begin{aligned} p_s(\bar{z}) &= \iint_{R_{\bar{z}}} p_{\bar{A}_\downarrow}(u) p_{\bar{A}_\uparrow}(v) dv du \\ &= \int_{u=0}^{u'} p_{\bar{A}_\downarrow}(u) \int_{v=0}^{u=\bar{z}-10 \log(10^{u/10} d_1 + d_2 + d_3)} p_{\bar{A}_\uparrow}(v) dv du \\ &= \int_{u=0}^{u'} p_{\bar{A}_\downarrow}(u) p_{\bar{A}_\uparrow}(\bar{z} - 10 \log(10^{u/10} d_1 + d_2 + d_3)) du, \end{aligned} \quad (20)$$

где $u' = 10 \log((10^{\bar{z}/10} - d_2 - d_3)/d_1)$.

4.2 Терминал T_2 , осуществляющий передачу при наличии изменяющихся во времени ошибок наведения антенны

В данном случае в передающем терминале T_2 вводятся изменяющиеся во времени ошибки наведения антенны. В целях ограничения дополнительных помех при наличии ошибок наведения антенны, плотность э.и.м. в направлении прицеливания должна быть уменьшена с B_s до B_t . Отношение (C/N) при наличии замирания в дожде и изменяющихся во времени ошибок наведения антенны на основании уравнения (2) описывается следующим образом:

$$(C/N)_t = \frac{C/A_\uparrow A_\downarrow}{N_\downarrow + N_\uparrow/A_\downarrow + N_r (1-1/A_\downarrow) + (I_{t,1} + I_{t,2})/(A_{\uparrow,J} A_\downarrow) + N_{\uparrow,2}/A_\downarrow}, \quad (21)$$

где члены $I_{t,1}$ и $I_{t,2}$, отражающие изменяющиеся во времени помехи, могут быть представлены как доли их соответствующих значений для статистического случая:

$$\begin{aligned} \frac{I_{t,1}}{I_{s,1}} &= \frac{B_t G_{2,t}(\varphi)}{B_s G_2(\varphi)} \\ \frac{I_{t,2}}{I_{s,2}} &= \frac{B_t G_{2,t}(0)}{B_s G_2(0)}. \end{aligned} \quad (22)$$

Вышеуказанные коэффициенты усиления антенны G_2 и $G_{2,t}$ могут быть получены на основании известной диаграммы направленности антенны, например нормированный коэффициент направленности антенны может быть представлен следующим образом:

$$G(\varphi) = \left(\frac{2^{n+1} (n+1)! j_{n+1}(\pi d/\lambda \times \sin \varphi)}{(\pi d/\lambda \times \sin \varphi)^{n+1}} \right), \quad (23)$$

где φ – угол отклонения от оси, J_{n+1} – функция Бесселя первого рода и порядка $(n+1)$, d – диаметр круговой апертуры, и λ – длина волны. В вышеприведенном уравнении n – параметр распределения поля по апертуре антенны и соответствует следующим распределениям: $n=0$, идеальное равномерное; $n=1$, параболическое; и $n=2$, параболическое квадратичное. Главный лепесток большинства используемых на практике систем с апертурой попадает между нормированными диаграммами направленности, соответствующими $n=1$ и $n=2$. Заметим, что боковые лепестки реальных антенн могут не точно соответствовать уравнению (23).

Коэффициент усиления антенны в отсутствие ошибок наведения согласно обозначениям, принятым в уравнении (22), $G_2(\varphi) = G(\varphi)$. В отсутствие ошибок наведения антенны ошибки в направлении прицеливания антенны могут характеризоваться ошибками по углу места и азимуту, которые обозначаются как ϕ_ϵ и ϕ_a , соответственно. Исходя из этого, требуемая угловая ошибка, которая представляет собой угол между направлением прицеливания антенны и направлением от T_2 на S_1 , может быть описана как $\Phi(\varphi, \phi_\epsilon, \phi_a)$, где функция Φ может быть определена для конкретной геометрии, как показано в разделе 3 Приложения 1. Коэффициент усиления антенны в уравнении (22) теперь имеет вид:

$$I_{t,1} \leq \frac{1}{\Delta B} \frac{1}{G_2(\varphi)} I_{s,1}. \quad (24)$$

При наличии ошибок наведения антенны вследствие отклонения главного луча T_2 от направления на S_2 это можно представить как $I_{t,2} < I_{s,2}$. Это значит, что для помех, принимаемых на R_1 через S_2 , ухудшение, обусловленное ошибками наведения антенны, всегда меньше ухудшения, обусловленного соответствующими помехами в статическом случае. Для помех, принимаемых через S_1 , исходя из уравнения (22), максимальное значение компонента помехи достигается, когда $G_{2,t}(\varphi)$, то есть, когда линия прицеливания антенны выровнена вдоль направления от T_2 к S_1 . Это показывает, что для рассматриваемой здесь системы из двух спутников изменяющаяся во времени мощность помехи может быть ограничена сверху независимо от величины ошибки наведения.

На основании уравнений (14) и (21) ухудшение отношения (C/N) в случае наличия ошибок наведения антенны имеет вид:

$$Z_t = (A_\uparrow / A_{\uparrow,I}) \times (A_\downarrow / A_{\downarrow,I} e_1 + A_{\uparrow,I} e_2 + G_{2,t}(\varphi) / \Delta B e_3 + G_{2,t}(0) / \Delta B e_4), \quad (25)$$

где переменные линии определены следующим образом:

$$\begin{aligned} e_1 &= \frac{1 + c_4}{1 + c_1 c_2 c_3 (1 + c_5) + c_2 c_3 + c_3} \\ e_2 &= \frac{c_1 c_2 c_3 c_5 + c_3 - c_4}{1 + c_1 c_2 c_3 (1 + c_5) + c_2 c_3 + c_3} \\ e_3 &= \frac{1}{G_2(\varphi)} \frac{c_2 c_3}{1 + c_1 c_2 c_3 (1 + c_5) + c_2 c_3 + c_3} \\ e_4 &= \frac{1}{G_2(0)} \frac{c_1 c_2 c_3}{1 + c_1 c_2 c_3 (1 + c_5) + c_2 c_3 + c_3}. \end{aligned} \quad (26)$$

Представим уравнение (25) в логарифмической форме:

$$\bar{Z}_t = \bar{A}_\uparrow - \bar{A}_{\uparrow,I} + 10 \log \left(10^{(\bar{A}_\downarrow + \bar{A}_{\downarrow,I})/10} e_1 + 10^{\bar{A}_{\uparrow,I}/10} e_2 + 10^{(\bar{G}_{2,t}(\varphi) - \bar{\Delta B})/10} e_3 + 10^{(\bar{G}_{2,t}(0) - \bar{\Delta B})/10} e_4 \right). \quad (27)$$

Как и в статистическом случае, для аналитической простоты рассмотрим частный случай $\bar{A}_{\uparrow,I} = 0$.

В этом случае интегральную функцию распределения \bar{Z}_t можно описать следующим образом:

$$\begin{aligned} P_t(\bar{z}) &= \Pr(\bar{Z}_t \leq \bar{z}) \\ &= \int_{R_z^-} p_{\bar{G}_{2,t}(0)}(w) p_{\bar{G}_{2,t}(\varphi)}(v) p_{\bar{A}_\downarrow}(u) p_{\bar{A}_\uparrow}(t) dt du dv dw, \end{aligned}$$

где область интеграла такова, что для $\bar{G}_{2,t}(0), \bar{G}_{2,t}(\varphi), \bar{A}_\downarrow, \bar{A}_\uparrow \in R_z; \bar{Z}_t \leq \bar{z}$. В качестве исходного условия здесь принято, что соответствующие случайные величины являются статистически независимыми; отметим, что в общих условиях случайные величины $\bar{G}_{2,t}(0)$ и $\bar{G}_{2,t}(\varphi)$ могут не быть статистически независимыми. В таких случаях в вышеприведенном выражении следует рассматривать совместное распределение этих двух случайных величин. Поскольку \bar{Z}_t является монотонно возрастающей функцией величин $\bar{G}_{2,t}(0), \bar{G}_{2,t}(\varphi), \bar{A}_\downarrow$ и \bar{A}_\uparrow , вышеприведенный интеграл можно представить следующим образом:

$$P_t(\bar{z}) = \int_{w=-\infty}^{w'} P_{\bar{G}_{2,t}(0)}(w) \int_{v=-\infty}^{v'} P_{\bar{G}_{2,t}(\varphi)}(v) \int_{u=0}^{u'} P_{\bar{A}_\downarrow}(u) p_{\bar{A}_\uparrow}(\bar{z} - 10 \log(10^{u/10} e_1 + e_2 + 10^{(v-\bar{\Delta B})/10} e_3 + 10^{(w-\bar{\Delta B})/10} e_4)) du dv dw, \quad (28)$$

где верхние пределы интеграла являются следующими:

$$\begin{aligned} u' &= 10 \log \left(\frac{10^{\bar{z}/10} - e_2 - 10^{(v-\bar{\Delta B})/10} e_3 - 10^{(w-\bar{\Delta B})/10} e_4}{e_1} \right) \\ v' &= 10 \log \left(\frac{10^{\bar{z}/10} - e_1 - e_2 - 10^{(w-\bar{\Delta B})/10} e_4}{e_3} \right) + \bar{\Delta B} \\ w' &= 10 \log \left(\frac{10^{\bar{z}/10} - e_1 - e_2 - 10^{-\bar{\Delta B}/10} e_3}{e_4} \right) + \bar{\Delta B}. \end{aligned} \quad (29)$$

Относительное увеличение значения неготовности линии вследствие изменяющихся во времени ошибок наведения антенны по сравнению с общим значением неготовности линии $R(\bar{z})$ (%) можно представить следующим образом:

$$R(\bar{z})\% = 100\% \times \frac{(1 - P_t(\bar{z})) - (1 - P_s(\bar{z}))}{(1 - P_t(\bar{z}))}. \quad (30)$$

Заметим, что на основании рассуждений, которые привели к выводу уравнения (24), можно заключить, что при более высоких значениях $\bar{\Delta B}$ $P_t(\bar{z})$ может превышать $P_s(\bar{z})$. Это означает, что в ряде случаев $R(\bar{z}) < 0$, то есть при уменьшении плотности э.и.и.м. в направлении прицеливания возможно добиться того, что изменяющиеся во времени помехи будут меньше соответствующих помех в случае отсутствия изменяющихся во времени ошибок наведения антенны. Для расчета $R(\bar{z})$, приведенного в уравнении (30), в качестве исходного условия примем, что общая неготовность линии составляет $p_i\%$, а $(100 - T_{allow})\%$ этой неготовности относится на статические помехи. Требуемый для данной неготовности линии в статических условиях запас на замирание \bar{z}^* рассчитывается на основании равенства $(1 - P_s(\bar{z}^*)) = p_i\% \times (100 - T_{allow})\%$. Общая неготовность линии при данном запасе на замирание в случае наличия изменяющихся во времени помех составляет $(1 - P_t(\bar{z}^*))$. Далее, относительное увеличение значения неготовности линии при данном запасе на замирание $R(\bar{z}^*)\%$ может быть рассчитано с помощью выражения, данного в уравнении (30).

ТАБЛИЦА 1

Параметры для линии верх от T_2 к R_1

Частота линии вверх (ГГц)	14,2
Потери в линии вверх, линии вниз (дБ)	207; 205,3 (Анкара) 207,2; 205,3 (Лондон)
Постоянная Больцмана (дБВт/Гц/К)	-228,6
Коэффициент усиления при малом сигнале на S_1 , G_{S_1} (дБ)	175,2
$(G/T)_{S_1}$ (дБ/К)	2 (Анкара) 4 (Лондон)
Частота линии вниз (ГГц)	11,7
T_r (К)	285
Угол отклонения от оси, от T_2 к S_1	2,22° (Анкара) 2,18° (Лондон)

ТАБЛИЦА 2

Параметры для расчета ослабления в дожде

Местоположение S_1 (Eutelsat W1)	10° в. д.
Местоположение S_2	12° в. д.
Местоположение T_1 (Канарские острова)	Широта: 27,76° с. ш. Долгота: -15,63° в. д.
Высота T_1 над средним уровнем моря (м)	205
Местоположение R_1 (Матера, Италия)	Широта: 40,39° с. ш. Долгота: 16,42° в. д.
Высота R_1 над средним уровнем моря (м)	527
Местоположение T_2 (Анкара, Турция)	Широта: 39,8° с. ш. Долгота: 32,8° в. д.
Местоположение T_2 (Лондон, Англия)	Широта: 51,5° с. ш. Долгота: -0,12° в. д.
Высота T_2 над средним уровнем моря (м)	200 (Анкара) 200 (Лондон)

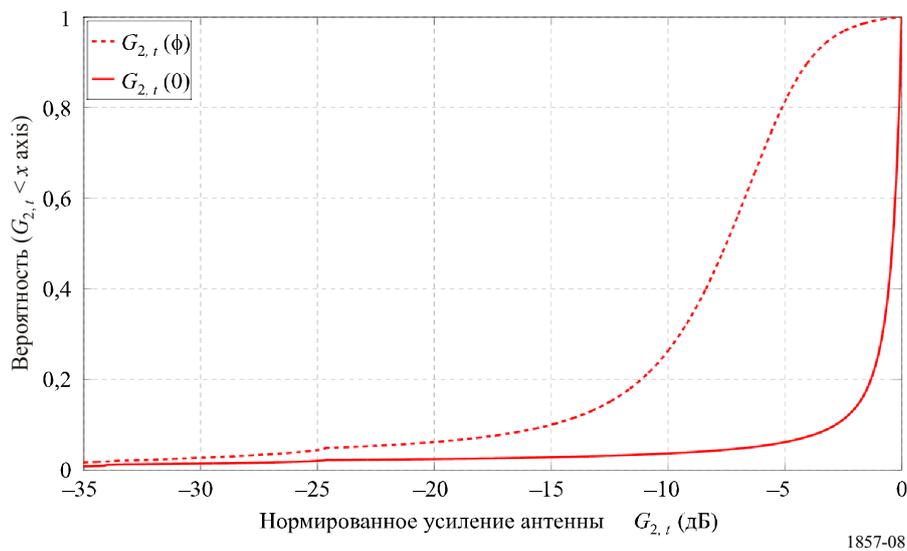
5 Пример расчета согласно вышеприведенной методике

В данном разделе представлен пример расчета для иллюстрации методики, представленной в разделе 4. Параметры линии, которые использовались в этом примере, приведены в таблице 1. Компоненты ослабления в дожде A_{\uparrow} , A_{\downarrow} и $A_{\uparrow,\downarrow}$ рассчитаны согласно Рекомендации МСЭ-R P.618 и на основании параметров, приведенных в таблице 2. В данном примере принято, что на приемном терминале R_1 используется антенна с большой апертурой. Поскольку усиление антенны таково, что $G_1(\theta) \ll G_1(0)$, помехи, принимаемые от S_2 на R_1 , в данном примере не учитывались.

На рисунке 8 показана интегральная функция распределения случайных величин $G_{2,t}(0)$ и $G_{2,t}(\varphi)$ для случая наличия изменяющихся во времени ошибок наведения антенны. Ошибки наведения антенны соответствуют ошибкам по углу места и по азимутальному углу, образуемым в результате распределения $S\alpha S$, как показано в разделе 2 Приложения 1, где использованы следующие параметры распределения: $\alpha = 1,5$ и $c = 0,35^\circ$. Использовалась конкретная диаграмма направленности антенны, данная в уравнении (23), при $n = 1$ и $d = 0,51$ м. В этом примере угол отклонения от оси в направлении от T_2 на $S_1 - \varphi$ – составляет $2,22^\circ$, а соответствующее нормированное усиление антенны $G_2(\varphi) = -6,7$ дБ. На указанном рисунке показаны отклонения $G_{2,t}(\varphi)$ при наличии ошибок наведения антенны. Отметим, что по сравнению со статическим случаем помехи S_1 будут увеличиваться при $G_{2,t}(\varphi) > G_2(\varphi)$ и уменьшаться при $G_{2,t}(\varphi) < G_2(\varphi)$.

РИСУНОК 8

Интегральная функция распределения нормированных значений усиления антенны $G_{2,t}(0)$ и $G_{2,t}(\varphi)$ при наличии изменяющихся во времени ошибок наведения антенны (T_2 находится в Анкаре, Турция)

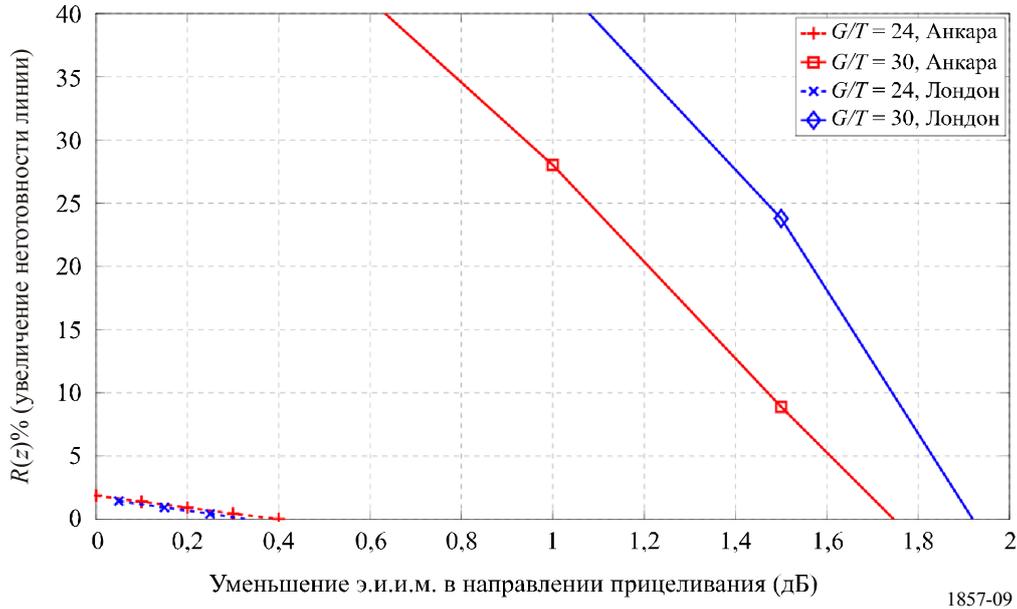


На рисунке 9 показано $R(\bar{z})\%$ для разных значений плотности э.и.и.м. в направлении прицеливания антенны. В этом примере для определения вероятностей $P_s(\bar{z})$ and $P_t(\bar{z})$ выполнено моделирование по методу Монте-Карло величин ухудшения \bar{Z}_s и \bar{Z}_t , заданных в уравнениях (19) и (27). Для наглядности в данном примере рассматриваются условия 98% готовности линии. Как изложено в разделе 2, это исходное требование, которое необходимо для обеспечения защиты соседних спутников; следовательно, для рассматриваемого примера $p_t\% = 2\%$. Предположим, что 90% ($T_{allow}\% = 10\%$) неготовности линии относятся на замирание в дожде и статические помехи, то есть $(1 - P_s(\bar{z})) = (1 - 0,98) \times 90\%$. Соответствующий запас на замирание \bar{z}_{margin} , удовлетворяющий вышеуказанному условию, определяется так, чтобы $(1 - P_s(\bar{z}_{margin})) = (1 - 0,98) \times 90\%$. Далее определяется общая неготовность линии при наличии ошибок наведения антенны и при данном запасе на замирание $1 - P_t(\bar{z}_{margin})$. Значение $R(\bar{z}_{margin})$ может быть получено из уравнения (30).

Как видно на рисунке 19, при наличии изменяющихся во времени ошибок наведения антенны неготовность линии может быть существенно снижена путем уменьшения плотности э.и.и.м. в направлении прицеливания. Заметим, что, как изложено выше, при более высоких значениях $\overline{\Delta B}$ возрастание неготовности линии может быть таким, что $R(\bar{z}) < 0$. Кроме того, для более высоких значений на приемном терминале (G/T) приемник более чувствителен к помехам, принимаемым от спутника; это увеличивает уровень помех и, следовательно, увеличивает значение неготовности линии.

РИСУНОК 9

$R(\bar{z})$ для параметров линии, указанных в таблицах 1 и 2. В легенде указано значение (G/T) (дБ/К) на приемном терминале R_1



6 Воздействие долговременных помех

Как было определено выше, мощность долговременных помех рассчитывается путем усреднения мощности помех в течение достаточного длительного периода времени, так чтобы были учтены все репрезентативные отклонения изменяющегося во времени сигнала помех. В соответствующих Рекомендациях МСЭ-R, в которых вводятся пределы усредненной мощности помех, рассматривается отношение мощности принимаемых помех к мощности шума всей приемной системы. В отсутствие изменяющихся во времени ошибок наведения антенны, рассматривая помехи от T_2 , принимаемые на R_1 через спутники S_1 и S_2 , это отношение мощности помех может быть представлено как:

$$f_s = \frac{I_{s,1} + I_{s,2}}{N_{\downarrow} + N_{\uparrow} + I_{s,1} + I_{s,2} + N_{\uparrow,2}} = \frac{c_2 c_3 + c_1 c_2 c_3}{1 + c_1 c_2 c_3 (1 + c_5) + c_2 c_3 + c_3} \quad (31)$$

Далее, в вышеуказанный статический случай вводятся изменяющиеся во времени ошибки наведения антенны, и мощность помех усредняется в интервале времени T_{avg} для получения усредненных по времени значений членов уравнения $I_{t,1}$ и $I_{t,2}$, отражающих помехи и обозначенных как $\langle I_{t,1} \rangle$ и $\langle I_{t,2} \rangle$. Средняя мощность помех как доля общей мощности шума системы может быть описана следующим образом:

$$f_t = \frac{\langle I_{t,1} \rangle + \langle I_{t,2} \rangle}{N_{\downarrow} + N_{\uparrow} + \langle I_{t,1} \rangle + \langle I_{t,2} \rangle + N_{\uparrow,2}} = \frac{c_2 c_3 \langle G_{2,t}(\varphi) \rangle / (\Delta B G_2(\varphi)) + c_1 c_2 c_3 \langle G_{2,t}(0) \rangle / (\Delta B G_2(0))}{1 + c_3 + c_2 c_3 \langle G_{2,t}(\varphi) \rangle / (\Delta B G_2(\varphi)) + c_1 c_2 c_3 \langle G_{2,t}(0) \rangle / (\Delta B G_2(0)) + c_1 c_2 c_3 c_5} \quad (32)$$

Таким образом, возрастание уровня долговременных усредненных помех относительно общего уровня помех выражается как:

$$R_L (\%) = 100\% \times \frac{f_i - f_s}{f_i}. \quad (33)$$

7 Иллюстративная процедура применения данной методики

В этом разделе представлена пошаговая процедура осуществления вычислений, описанных в разделе 4. В частности, с помощью этой процедуры, в основе которой лежит метод Монте-Карло, рассчитывается увеличение значения неготовности линии, обусловленное изменяющимися во времени ошибками наведения антенны. Заметим, что данный подход имеет иллюстративное назначение, поскольку могут использоваться и иные подходы.

7.1 Входные данные для вычислений

Параметры линии: долгота и широта объектов T_1 , R_1 и T_2 ; долгота спутников S_1 и S_2 ; θ , $G_1(\theta)$, $(G/T)_1$, T_{\downarrow} ; ϕ , нормированная диаграмма направленности антенны T_2 , $G_2(\phi)$; G_{S1} , G_{S2} , $(G/T)_{S1}$, $(G/T)_{S2}$; L_d , L_u , T_r .

Параметры дождя: скорость выпадения дождя (0,01% мм/ч), высота над средним уровнем моря и высота слоя дождя (для T_1 , R_1 и T_2). Эти параметры могут быть также рассчитаны с помощью Рекомендаций МСЭ-R P.837 и МСЭ-R P.839.

Неготовность линии: требуемые процентные доли времени, отражающие неготовность линии $p_i\%$. Допуск по времени, относимый на отказы линии, при изменяющихся во времени помехах $T_{allow}\%$.

Параметр моделирования по методу Монте-Карло: значения длины случайных векторов N .

Характеристики ошибки наведения антенны: векторы ошибок по азимуту и углу места длиной N , ϕ_e и ϕ_a , создаваемые согласно изложенному в разделе 2 Приложения 1.

7.2 Ухудшение отношения (C/N) в случае отсутствия изменяющихся во времени ошибок наведения антенны

Шаг 1: определить B_s , плотность э.и.и.м. в направлении прицеливания T_2 , используя $G_2(\phi)$ и согласно Рекомендации МСЭ-R S.728. Принимается, что B_s соответствует разным требованиям к помехам и координации, сводка которых содержится в Рекомендации МСЭ-R S.1432.

Шаг 2: рассчитать переменные линии.

- используя параметры линии, рассчитать переменные c_1 , c_2 , c_3 , c_4 , и c_5 согласно уравнению (18);
- рассчитать d_1 и d_2 , как показано в уравнении (17).

Шаг 3: определить значения замирания в дожде на линии вверх и линии вниз.

- используя параметры дождя, определить интегральные функции распределения значений замирания в дожде в линии вверх и линии вниз \bar{A}_{\uparrow} , \bar{A}_{\downarrow} и $\bar{A}_{\uparrow,I}$ согласно Рекомендации МСЭ-R P.618;
- на основании этих интегральных функций распределения определить три вектора случайных величин, каждый длиной N , для \bar{A}_{\uparrow} , \bar{A}_{\downarrow} и $\bar{A}_{\uparrow,I}$.

Шаг 4: с помощью уравнения (19) построить вектор случайных величин для \bar{Z}_s .

Шаг 5: определить интегральную функцию распределения \bar{Z}_s , $P_s(\bar{z})$, используя этот вектор случайных величин.

Шаг 6: рассчитать запас на замирание \bar{z}_i , требуемый для неготовности линии $p_i\% \times (100 - T_{allow})\%$. Требуемое значение \bar{z}_i удовлетворяет следующему условию: $(1 - P_s(\bar{z})) = p_i / 100 \times (100 - T_{allow}) / 100$.

7.3 Ухудшение отношения (C/N) в случае наличия изменяющихся во времени ошибок наведения антенны

Шаг 7: определить параметры линии e_1, e_2, e_3 и e_4 в уравнении (13).

Шаг 8: построить два случайных вектора, каждый длиной N , для $G_{2,t}(0)$ и $G_{2,t}(\varphi)$.

- как указано в разделе 2 Приложения 1, построить два случайных вектора, каждый длиной N , для переменных ошибки наведения ϕ_ε и ϕ_a ;
- используя связанные долготу и широту и ошибки наведения, рассчитать угловые векторы от направления прицеливания T_2 к спутникам S_1 и S_2 , $\Phi(\varphi, \phi_\varepsilon, \phi_a)$, $\Phi(\varphi, \phi_\varepsilon, \phi_a)$ и $\Phi(0, \phi_\varepsilon, \phi_a)$, как показано в разделе 3 Приложения 1. Заметим, что согласно принятой в Приложении 1 системе обозначений, $\Phi(\varphi, \phi_\varepsilon, \phi_a)$ соответствует θ_{BS_φ} в уравнении (4);
- определить случайные величины длины N для $G_{2,t}(0)$ и $G_{2,t}(\varphi)$ следующим образом: $G_{2,t}(\varphi) = G_2(\Phi(\varphi, \phi_\varepsilon, \phi_a))$.

Шаг 9: установить ΔB в качестве параметра.

Шаг 10: построить \bar{Z}_t в уравнении (12), который является случайным вектором с длиной N .

Шаг 11: определить интегральную функцию распределения \bar{Z}_t , $P_t(\bar{z})$, используя этот вектор случайных величин.

Шаг 12: определить готовность линии при запасе на замирание \bar{z}_i , который был рассчитан на шаге 6, $P_t(\bar{z}_i)$.

Шаг 13: определить относительное увеличение значения неготовности линии $R(\bar{z}_i)$ согласно уравнению (30).

8 Резюме

В данном Приложении представлена методика оценки воздействия помех на соседние спутники, обусловливаемых изменяющимися во времени ошибками наведения антенны VMES.

Конкретным назначением данной методики является оценка возрастания уровня помех относительно стационарного терминала, имеющего точно такие же характеристики, что и терминал, установленный на транспортном средстве, но не имеющего ошибок наведения антенны, обусловленных движением. Принятый в методике подход аналогичен подходу, введенному в Рекомендации МСЭ-R S.1323, где на воздействие условий распространения, таких как замирание в дожде и колебания шума приемника, относится не более 90% допуска по времени на отказы линии. В настоящей Рекомендации на воздействие условий распространения и помехи статического терминала относится $(100 - T_{allow})\%$ соответствующего допуска по времени. Также представлена методика оценки возрастания долговременных помех относительно статического случая. В процессе анализа долговременных помех сигнал усредняется в течение периода T_{avg} , который принимается достаточно длительным, таким, чтобы в течение этого периода обеспечивалось сравнительно точное представление статистических характеристик помех.