

МСЭ-R

Сектор радиосвязи МСЭ

Рекомендация МСЭ-R F.1096-1

(04/2011)

Методы расчета помех на линии прямой видимости в системах фиксированной беспроводной связи для учета рассеяния сигналов у земной поверхности

**Серия F
Фиксированная 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, 2011 г.

© ITU 2011

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 F.1096-1

Методы расчета помех на линии прямой видимости в системах фиксированной беспроводной связи для учета рассеяния сигналов у земной поверхности¹

(1994-2011)

Сфера применения

Настоящая Рекомендация предназначена для расчета влияния земной поверхности на образование помех системам фиксированной беспроводной связи.

Ассамблея радиосвязи МСЭ,

учитывая,

- a) что помехи от других систем и других служб фиксированной беспроводной связи могут оказывать влияние на качество работы систем фиксированной беспроводной связи на линии прямой видимости;
- b) что мощность сигнала от передающей антенны в одной системе может распространяться как помеха приемной антенне другой системе по дуге большого круга в пределах прямой видимости (LoS);
- c) что мощность сигнала от передающей антенны в одной системе может распространяться как помеха приемной антенне другой системе посредством механизма рассеяния от естественных и антропогенных объектов, находящихся на поверхности Земли;
- d) что участки местности, вызывающие сопряжение этих помех, могут не находиться вблизи дуги большого круга, однако должны быть видимы, как мешающей передающей антенне, так и приемной антенне системы, испытывающей помехи;
- e) что компонент мощности помехи, образующийся в результате ее рассеяния у земной поверхности, может значительно превосходить мощность помехи, поступающую по дуге большого круга между антеннами;
- f) что разработаны эффективные методы расчета мощности помехи, рассеянной от земной поверхности,

рекомендует,

1 чтобы эффекты рассеяния у земной поверхности, когда это уместно, включались в расчеты мощности помехи в тех случаях, когда данная помеха создается сигналами от передающей антенны одной системы, поступающими на приемную антенну другой системы, и когда применяются одно или оба из следующих условий (см. Примечание 1):

1.1 между передающей антенной мешающей системы и приемной антенной системы, испытывающей помехи, имеется трасса распространения LoS;

1.2 на поверхности Земли имеются естественные и антропогенные объекты, видимые как с передающей антенны мешающей системы, так и с приемной антенны системы, испытывающей помехи;

2 чтобы для расчета помех, образующихся в результате рассеяния сигналов у земной поверхности, использовались методы, представленные в Приложении 1.

¹ Рекомендация МСЭ-R P.452 "Процедура прогнозирования для оценки помех между станциями, находящимися на поверхности Земли, на частотах выше приблизительно 0,1 ГГц" в 3-й Исследовательской комиссии рассматриваются другие механизмы распространения.

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Отражения света или дифракционное распространение не рассматриваются в методах расчета, описание которых дается в настоящей Рекомендации.

Приложение 1

Помехи системам фиксированной беспроводной связи, создаваемые в результате рассеяния у земной поверхности

1 Введение

Рассеяние у земной поверхности признано особо стойким механизмом взаимодействия помех между радиорелейными системами в случаях, когда две трассы пересекают друг друга, а участок местности на пересечении этих трасс находится в поле видимости как передающей антенны одного транзитного участка, так и приемной антенны другого участка. В этом случае главные лепестки двух антенн взаимодействуют через общий участок местности, и помеха, наподобие отражения от земной поверхности, принимается в бистатической радарной системе.

В прошлом помеха между системами фиксированной беспроводной связи определялась путем расчетов, основанных на механизме распространения вблизи большого круга, который включает трассы LoS, эффекты рефракции в атмосфере, дифракцию у поверхности Земли и тропосферное прямое рассеяние. Эти методы большого круга, в сочетании со связью между боковыми лепестками антенны, на протяжении многих лет использовались некоторыми администрациями для определения помех внутри наземных систем и между наземными системами фиксированной беспроводной связи. Измерения в полевых условиях, проводившиеся в последние годы, показали, что распространение сигнала по дуге большого круга зачастую оказывает лишь незначительное влияние, по сравнению с рассеянием у земной поверхности.

В отличие от случая помех между системами, несоответствия между прогнозами на основе большого круга и результатами измерений становятся менее значительными в отношении помех внутри систем, где основные случаи происходили между двумя соседними транзитными участками на одном и том же маршруте.

В случае помех между земной станцией и наземной станцией их взаимодействие может также возникать через основной лепесток антенны наземной станции, площадь вокруг земной станции и боковые лепестки антенны земной станции. В зависимости от геометрических особенностей, преобладающим механизмом помех может являться либо рассеяние у земной поверхности, либо взаимодействие помех на дуге большого круга.

2 Математическая модель рассеяния у земной поверхности

Мощность помехи, P_r , принятой через механизм рассеяния у земной поверхности от мощности излучения антенны передающей станции, P_t , может быть определена из уравнения бистатического радара:

$$P_r = P_t \frac{\lambda^2}{(4\pi)^3} \int_{\Omega} \frac{G_t G_r}{R_t^2 R_r^2} \gamma dA_e, \quad (1)$$

где t и r – соответственно, передатчик и приемник, $G(\theta, \phi)$ – соответствующие коэффициенты усиления мощности антенны в направлении рассеивающих объектов на элементарной площади рассеяния dA_e , θ представляет собой азимут, а ϕ – угол места от центральной линии антенны (см. рис. 1), R_t и R_r – соответствующие расстояния по наклонной от антенн до элемента рассеяния, λ – длина волны, а γ – измененный коэффициент рассеяния, характеризующий некогерентную энергию, рассеянную на элементарной площади. Элементарная площадь dA_e определена как минимальный размер площадей рассеивающего объекта, расположенного под прямым углом к наклонным векторам от передатчика и приемника.

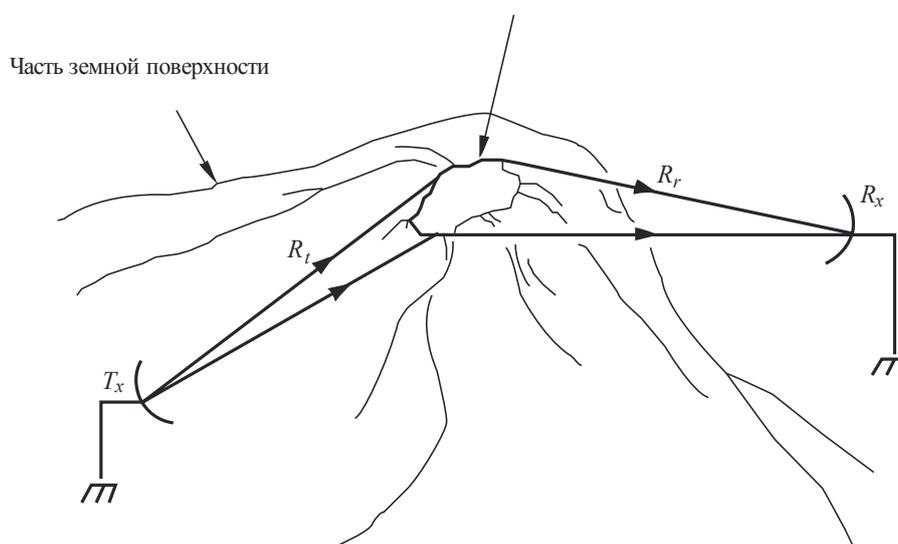
Уравнение (1) предполагает, что поля рассеяния от различных площадей или объектов некогерентные и что район Ω содержит все элементарные районы, которые влияют на принятую рассеянную энергию. При оценке интеграла для какой-либо части поверхности Земли необходимо учитывать затенение отдельных элементарных площадей. Будут оказывать влияние только незатененные площади, находящиеся в поле видимости как передающих, так и приемных антенн.

Сравнение измеренных и рассчитанных величин помех показывает, что можно допустить, что измененный коэффициент рассеяния γ является постоянным для достаточно обширной площади земной поверхности. В таблице 1 приводятся собственные значения γ , которые были определены одной администрацией для различных почвенно-растительных покровов.

РИСУНОК 1

Рассеяние от земной поверхности

Часть элементарного рассеивающего объекта,
видимая как с T_x , так и с R_x



F.1096-01

ТАБЛИЦА 1

Тип рассеяния	γ (дБ)
Типы земного покрова (из базы данных Соединенных Штатов Америки)	
– жилой район города	–8
– коммерческий район и район расположения различных служб	–7
– лиственный лес	–16
– смешанный лес	–20
Искусственные сооружения из базы данных Федерального управления гражданской авиации	10,4

Интеграл для определения мощности помехи, (1), может быть выражен как конечное суммирование:

$$P_r = C_t \sum_{\Omega} \frac{G_t(p_i) G_r(p_i)}{R_t^2(p_i) R_r^2(p_i)} \gamma_i A_{e,i}, \quad (2)$$

$$C_i = P_i \frac{\lambda^2}{(4\pi)^3}, \quad (3)$$

где:

γ_i : коэффициент i -й ячейки;

p_i : средняя точка ячейки;

$A_{e,i}$: фактическая площадь i -й ячейки, содержащейся в совокупности ячеек, Ω .

Измерения помех, произведенные на фиксированной частоте, обычно показывают временные колебания вокруг среднего значения, рассчитанного с использованием уравнения (2). Это объясняется движением рассеивающих объектов, например деревьев, растительности или временными колебаниями состояния атмосферы, которые могут вызывать амплитудные и фазовые изменения в период между возвращениями рассеяния из различных рассеивающих площадей. Аналогично этому, колебания около одного и того же среднего значения наблюдаются тогда, когда несущая частота в эксперименте изменяется. К счастью, для важного случая помех между цифровыми радиосистемами важным является только среднее значение, полученное с помощью уравнения (2). С другой стороны, если источником помехи является несущая ЧМ сигнала с низким индексом, то колебания этой несущей выше среднего значения (увеличение уровня сигнала) должны учитываться.

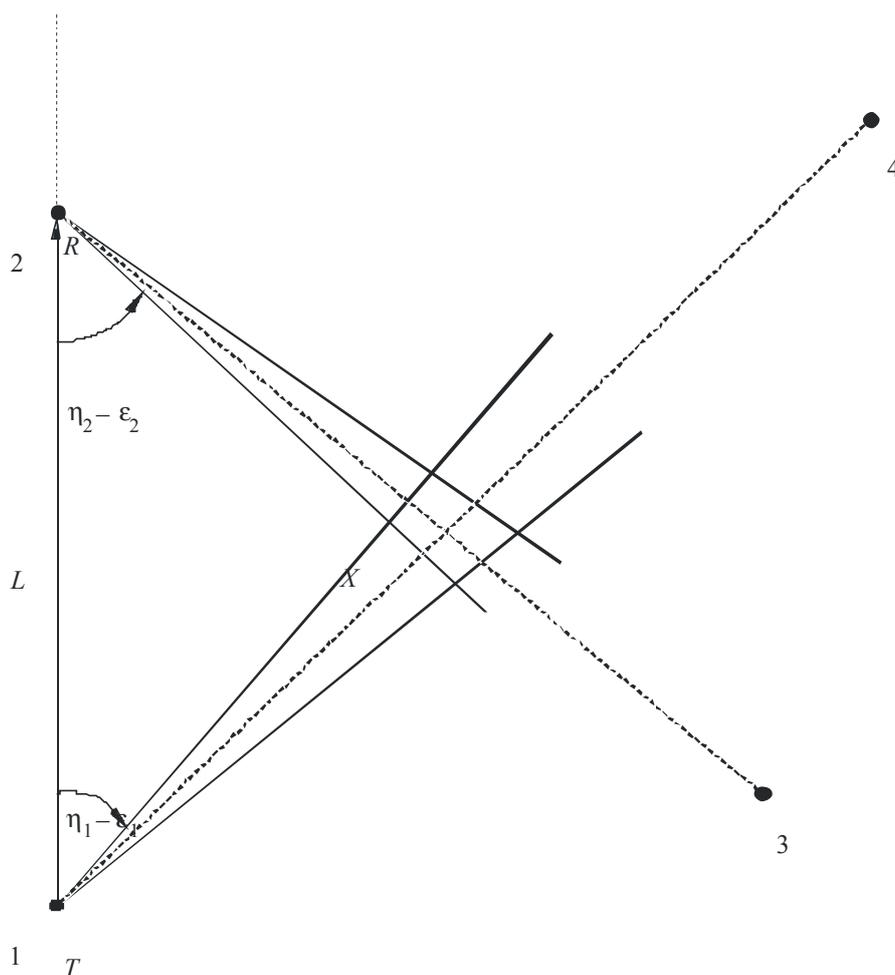
2.1 Применение модели

Практические соображения, касающиеся компьютерных ресурсов, накладывают ограничение на физический размер части района Ω , в отношении которого будет оценен интеграл. Один подход заключается в том, чтобы взять данный район интегрирования в качестве прямоугольника на поверхности Земли, определенного пересечением азимутального сектора с центром в мешающей передающей антенне с азимутальным сектором с центром в приемной антенне, испытывающей помехи. На рисунке 2 такой район показан для случая, когда трасса от станции 1 к станции 4 пересекается с трассой от станции 3 к станции 2, что приводит к возникновению помехи рассеяния у поверхности земли от станции 1 станции 2. В центре секторов будет находиться азимут главного луча соответствующих антенн, и эти сектора могут включать азимуты в тех случаях, когда коэффициент направленности антенны в азимутальном направлении оказывается, предположим, на 30 дБ ниже максимального коэффициента усиления антенны. Оценка интеграла помехи в отношении такого района приводится в п. 3.1.

Ограничивающие методы позволяют получить более обоснованные, более точные и более эффективные способы оценки мощности помехи рассеяния. Поскольку большая часть принятой энергии, рассеянной у поверхности земли, образуется обычно в результате рассеяния от районов, находящихся вблизи пересечения главных лучей мешающей антенны и антенны, испытывающей помехи, то точное интегрирование требуется только в непосредственной близости от этого пересечения. Влияние от остальной части Ω можно определить от верхней границы. Описание применения ограничивающих методов приводится в п. 3.2.

Элементарная площадь земной поверхности может оказывать ненулевое влияние на интеграл помехи только в том случае, если она не затенена. То есть она должна быть видима для антенн как передающей, так и приемной станций. При оценке затенения элементарной площади необходимо учитывать как макро-, так и микрозатенение. При макрозатенении элемент не видим из-за препятствий рельефа местности, находящихся в непосредственной близости от одной из антенн; при микрозатенении соответствующий элемент не представляет эффективную площадь, $A_{e,i}$ для одной из антенн из-за своей ориентации. Описание условий, необходимых для определения того, является ли тот или иной элементарный район макро- или микрозатененным, приводится, соответственно, в пп. 4.1 и 4.2.

РИСУНОК 2
Геометрия помехи



F.1096-02

В следующих расчетах допускается, что имеются достоверные цифровые карты рельефа для данного района интегрирования. Эти данные имеют форму высот для набора точек, определенных на геодезических координатах широты и долготы. Хотя имеются и могут быть использованы данные карты с высокой разрешающей способностью с интервалами в 3 секунды дуги, необходимая точность может быть получена с использованием данных в 15 секунд дуги.

При проведении расчетов диаграммы направленности антенны зачастую основываются на данных измерений, которые хранятся в компьютерных справочных таблицах, или ими могут являться аналитические выражения измеренных диаграмм. Для упрощения, общедоступная азимутальная диаграмма направленности может вращаться вокруг оси прицеливания.

3 Методики интегрирования

3.1 Прямая оценка

Интегрирование по выбранной области S_0 может быть оценено следующим образом:

$$P_{r,o} = C_t \sum_{p_i \in S_0} \frac{G_t(p_i) G_r(p_i)}{R_t^2(p_i) R_r^2(p_i)} \gamma_i A_{e,i}, \quad (4)$$

где точки p_i принадлежат районам $A_{e,i}$, которые образуют правильное разбиение района S_0 :

$$S_0 = \bigcup_i A_{e,i} \quad A_{e,i} \cap A_{e,j} = \emptyset \quad \text{для } i \neq j. \quad (5)$$

Хотя интегрируемые величины определены на прямоугольной сетке, удобнее использовать триады точек для того, чтобы определить плоские элементарные районы. Они определяют треугольные районы, которые используются для получения $A_{e,i}$ – минимальной площади, видимой для передатчика и приемника:

$$A_{e,i} = \min\{A_{t,i}, A_{r,i}\}. \quad (6)$$

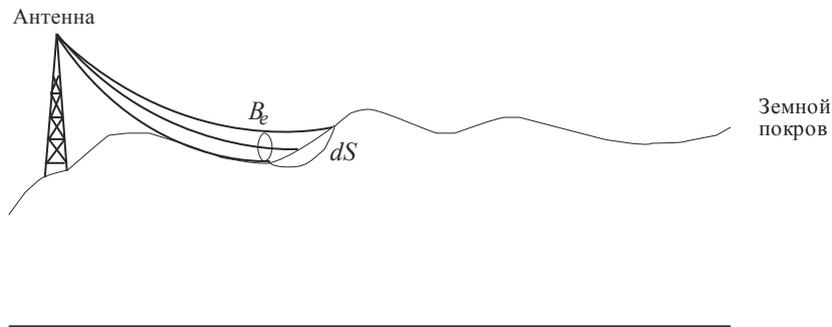
Если район затенен, то соответствующий член исключается из интегрирования.

Элементарная площадь $A_{e,i}$ определяется видимой частью проекции поверхности ΔS_i на плоскость, перпендикулярную направлению луча (см. рис. 3):

$$A_{e,i} = \min\{B_{t,i}, B_{r,i}\}. \quad (7)$$

РИСУНОК 3

Элементарный рассеивающий объект



F.1096-03

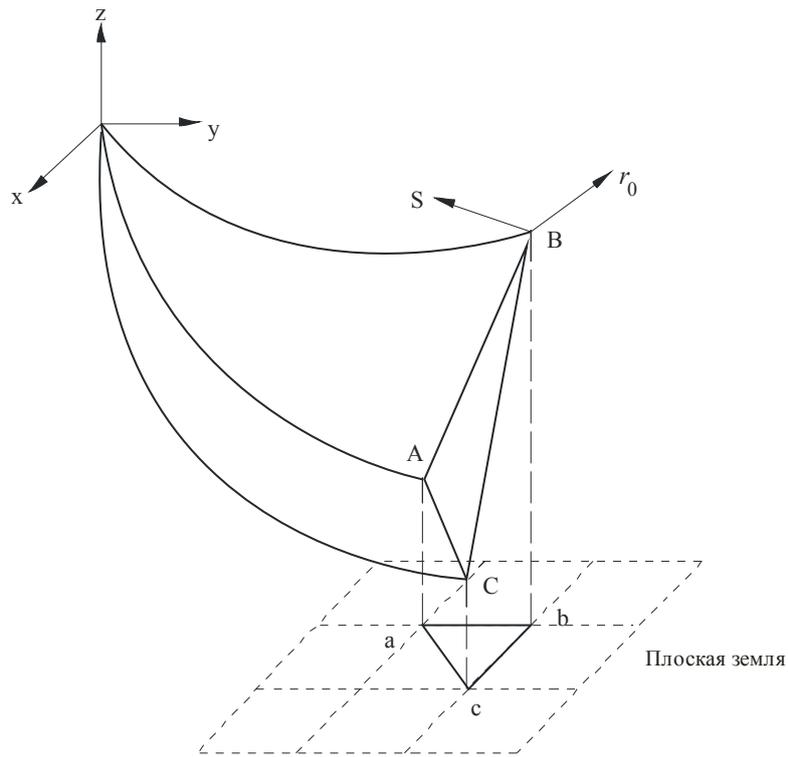
Максимальная видимая элементарная площадь может быть выражена следующим образом:

$$B_e = 0,5 \cdot [h(\sin \theta, \cos \theta) \cdot \cos(\varphi + 2\mu) - \Delta x \Delta y \cdot \sin(\varphi + 2\mu)], \quad (8)$$

$$h(u, v) = u \cdot \Delta y \Delta z_{cb} + v \cdot \Delta x \Delta z_{ab}$$

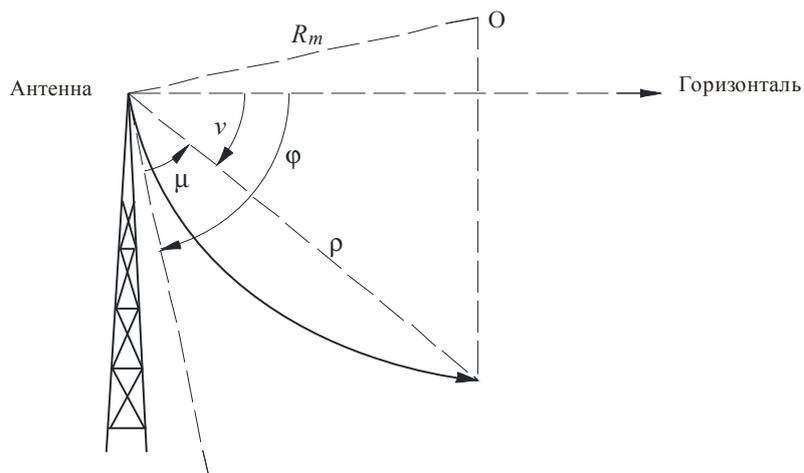
где Δz_{ba} и Δz_{bc} – приращения углов места точек треугольника сетки по отношению к углу места точки прямого угла (см. рис. 4); Δx и Δy – размеры ячейки сетки, φ и θ – угол места и азимут средней точки треугольника; μ – угол между хордой и касательной рассеянного луча (см. рис. 5). Следует обратить внимание, что $A_{e,i}$ – это площадь, спроектированная на единичную сферу площади земной поверхности ΔS_i , которая не зависит от условий распространения.

РИСУНОК 4
Фактическая площадь рассеивающего объекта



F.1096-04

РИСУНОК 5
Угол места



F.1096-05

Данное уравнение не требует расчета углов, поскольку можно прямо рассчитать все тригонометрические функции в (8):

$$\begin{aligned} \sin \theta &= \frac{x}{(x^2 + y^2)^{1/2}}, & \cos \theta &= \frac{y}{(x^2 + y^2)^{1/2}}; \\ \sin(\varphi + 2\mu) &= \frac{z}{\rho} \left(1 - \frac{\rho^2}{4R_e^2}\right)^{1/2} + \frac{d}{2R_e}; \\ \cos(\varphi + 2\mu) &= \frac{d}{\rho} \left(1 - \frac{\rho^2}{4R_e^2}\right)^{1/2} - \frac{z}{2R_e}, \end{aligned} \quad (9)$$

где $\rho = (x^2 + y^2 + z^2)^{1/2}$ – расстояние между антенной и рассеивающим объектом, $d = (x^2 + y^2)^{1/2}$ – его проекция на горизонтальную плоскость, $R_e = a \cdot k$, a – радиус Земли, k – коэффициент при радиусе Земли, который зависит от градиента показателя преломления в атмосфере.

Подстановка (9) в (8) дает:

$$B_e = 0,5 \cdot \left[h(x, y) \cdot \left(\frac{1}{\rho} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\rho}{2R_e}\right)^2} - \frac{z}{2R_e} \right) - \Delta x \Delta y \cdot \left(\frac{z}{\rho} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\rho}{2R_e}\right)^2} + \frac{d}{2R_e} \right) \right], \quad (10)$$

где (x, y, z) – координаты средней точки треугольника. Поскольку $z \ll R_e$, то данное уравнение можно упростить:

$$B_e = \frac{0,5}{\rho} \cdot [h(x, y) - \Delta x \Delta y \cdot z] - \Delta x \Delta y \frac{d}{4R_e}. \quad (11)$$

3.2 Методы установления пределов

Рекурсивный метод расчета P_r может быть разработан путем разбиения совокупности Ω на взаимоисключающие подмножества S_0 и Q_0 :

$$S_0 \cup Q_0 = \Omega, \quad S_0 \cap Q_0 = \varnothing \quad (12)$$

и представления интеграла (1) в виде суммы двух интегралов:

$$P_r = C_t \int_{S_0} \frac{G_t G_r}{R_t^2 R_r^2} \gamma dA_e + C_t \int_{Q_0} \frac{G_t G_r}{R_t^2 R_r^2} \gamma dA_e. \quad (13)$$

Это выражение оценивается путем численного интегрирования первого члена и ограничения второго. Если данный предел намного меньше рассчитанного значения первого интеграла, то интеграл по совокупности Ω может быть заменен интегралом по S_0 . Требуемая точность оценки определяет, сколь малым должен быть предел, по сравнению с интегралом. В большинстве приложений, если этот предел меньше интеграла в 0,1 раза, то интеграл по совокупности Ω может быть заменен интегралом по S_0 , что приводит к ошибке в менее 0,41 дБ при оценке P_r . При оценке такую ошибку разумно принять, особенно с учетом погрешностей при определении коэффициентов рассеяния и координат точки на карте. В целом поскольку антенны являются остронаправленными, то область S_0 точного интегрирования значительно меньше, чем вся область в целом.

Если предел в отношении Q_0 не намного меньше, чем интеграл по S_0 , – заменить область интегрирования S_0 на более обширный район $S_0 \cup S_1$ ($S_1 \subset Q_0$). Определить Q_1 как дополнение S_1 в отношении Q_0 так, чтобы $S_1 \cup Q_1 = Q_0$, а $S_1 \cap Q_1 = \varnothing$. Оценить предел в отношении Q_1 . Поскольку интеграл по Q_1 не может быть больше, чем интеграл по Q_0 , то предел в отношении Q_1 , как правило, меньше, чем предел в отношении Q_0 . Кроме того, интеграл по $S_0 \cup S_1$ должен быть больше, чем интеграл по S_0 . Поэтому, если этот процесс повторяется n количество раз, то этот предел становится меньше, чем интеграл по $\cup_i S_i$, позволяя, тем самым, заменить интеграл по совокупности Ω интегралом по подмножеству $\cup_i S_i$. На практике, желательно, чтобы n было не больше, скажем, одного или двух. Этого можно добиться путем правильного выбора S_0 и разработки соответствующего алгоритма, так чтобы предел в отношении Q_0 (и другого Q_i) был, по возможности, жестким.

Следует обратить внимание на то, что можно добавить S_i к фактическому району интегрирования и использовать результаты, полученные ранее, для того чтобы интегрирование по какой-либо области S_i осуществлялось только один раз. Поскольку эти пределы подсчитать легче, то для обеспечения точности оценки этот процесс можно повторять настолько часто, насколько это потребуется.

Оценка верхних пределов, Q_0, Q_1, \dots , использует неравенство $\gamma dA_e \leq \gamma R_t^2 d\omega_t$, где $d\omega_t$ – телесный угол с центром в антенне элемента dS (см. Примечание). Использование сферических координат с центром в передатчике:

$$P_{r,e} = C_t \int_{Q_0} \frac{G_t G_r}{R_t^2 R_r^2} \gamma dA_e \leq C_t \max_{Q_0} \left[\frac{\gamma G_t G_r}{R_r^2} \right] D_0, \quad (14)$$

где D_0 – площадь проекции района интегрирования Q_0 на единичную сферу с центром в передатчике, а φ_t и θ_t – угол места и азимут элементарного рассеивающего объекта.

Поскольку:

$$\max_{Q_0} \left[\frac{\gamma G_t G_r}{R_r^2} \right] \leq \left[\frac{\gamma_{\max} G_{t,\max} \cdot G_{r,\max}}{R_{r,\min}^2} \right], \quad (15)$$

где максимум и минимум взяты в отношении района Q_0 :

$$P_{r,e} \leq C_t \frac{G_{t,\max} \cdot G_{r,\max}}{R_{r,\min}^2} \gamma_{\max} D_0. \quad (16)$$

Использование сферических координат с центром в приемнике дает аналогичный результат:

$$P_{r,e} \leq C_t \frac{G_{t,\max} \cdot G_{r,\max}}{R_{t,\min}^2} \gamma_{\max} D_0. \quad (17)$$

Более жесткий из этих двух пределов имеет вид:

$$P_{r,e} \leq C_t \frac{G_{t,\max} G_{r,\max}}{R_m^2} \gamma_{\max} D_0, \quad (18)$$

где:

$$R_m = \max \{R_{r,\min}, R_{t,\min}\}. \quad (19)$$

Различные пределы могут быть найдены путем выбора различных районов S_0 . В наиболее важном случае S_0 представляет собой район земной поверхности, лежащий на пересечении углов $|\theta_{r,0} - \theta_r| < \varepsilon_1$, $|\theta_{t,0} - \theta_t| < \varepsilon_2$, где $\theta_{r,0}$ и $\theta_{t,0}$ – азимуты направления антенны (см. рис. 2). Если ε_1 и ε_2 таковы, что коэффициенты усиления антенн внутри этих углов больше местных максимальных значений в их боковых лепестках, то вышеупомянутый предел может быть переписан как:

$$P_{r,e} \leq C_t \frac{G_r(\theta_{r,0} + \varepsilon_1, \varepsilon_2) \cdot G_t(\theta_{t,0} + \varepsilon_1, \varepsilon_2)}{R_m^2} \gamma_{max} D_0, \quad (20)$$

В данном конкретном случае, $R_{t,min}$ и $R_{r,min}$ могут быть найдены из треугольника RXT, показанного на рисунке 2.

$$R_{t,min} = \frac{L \sin(\eta_2 - \varepsilon_2)}{\sin(\eta_1 + \eta_2 - \varepsilon_1 - \varepsilon_2)},$$

$$R_{r,min} = \frac{L \sin(\eta_1 - \varepsilon_1)}{\sin(\eta_1 + \eta_2 - \varepsilon_1 - \varepsilon_2)}. \quad (21)$$

Метод расчета площади D_0 представлен в Приложении 2. Однако, чтобы избежать сложных расчетов, эта площадь может быть ограничена общей площадью единичной сферы, равной 4π .

Предыдущие пределы основывались на направленности антенны. Другие пределы могут быть выведены из уравнения (2). Например, удаленные районы могут быть исключены из интегрирования. Соответствующий предел имеет следующую форму:

$$P_{r,x} \leq C_t \frac{G_r(\theta_{r,0}, 0) \cdot G_t(\theta_{t,0}, 0)}{R^2} \gamma_{max} \overline{D_0}, \quad (22)$$

где $\overline{D_0}$ – площадь проекции района S_0 на единичную сферу, R – выбран таким образом, чтобы $P_{r,x} + P_{r,e}$ было меньше, чем требуемая точность.

Примечание Директора БР. – В порядке информации сообщается, что выведение этой оценки приводится в:

SMITH, W.E., SULLIVAN, P.L., GIGER, A.J. и ALLEY. G.D. [June, 1987] Recent advances in microwave interference prediction. IEEE International Conference on Communications (ICC '87), paper 23.2.

4 Затенение

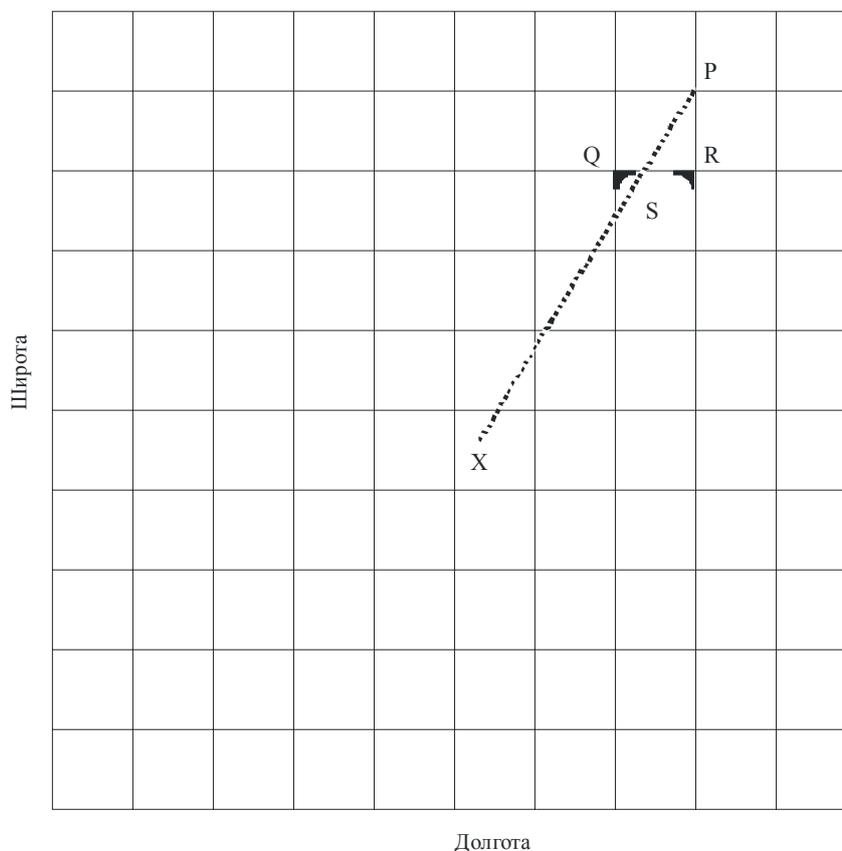
4.1 Макрозатенение

Поскольку затенение элементарной площади может быть связано с затенением ее отдельных точек, то необходимо определить затенение составляющих точек. Для этой цели было бы удобно использовать сферические координаты с центром в антенне. При расчете затенения с использованием сферической системы координат, алгоритм должен только следить за самым большим углом входного излучения вдоль радиальной плоскости, обновляя максимальный угол входного излучения только по мере необходимости.

Когда используется система прямоугольных координат, принципы затенения не меняются, однако определить видимость какой-либо точки на сетке координат нелегко, поскольку нет гарантии того, что одна или несколько точек на сетке координат могут быть найдены с тем же азимутом, что и контрольная точка. Должна быть сделана аппроксимация максимального угла входного излучения вдоль радиальной линии для того, чтобы угол входного излучения контрольной точки можно было сравнить с этим значением и, тем самым, определить ее видимость. Для данной контрольной точки Р необходимо сначала определить две точки Q и R на сетке координат, которые находятся ближе, чем контрольная точка, покрывают радиальную линию от антенны до контрольной точки, имеют минимальную азимутальную разницу и минимальные углы входного излучения. Проекция этих точек на горизонтальную плоскость показана на рисунке 6.

РИСУНОК 6

Затенение контрольной точки Р с использованием видимых углов выхода излучения в точках Q и R



F.1096-06

Необходимо сравнить угол входного излучения относительно контрольной точки Р с видимым углом выхода излучения, который может ассоциироваться с точкой пересечения S радиальной плоскости с отрезком прямой, соединяющим две точки на сетке координат. Эта радиальная плоскость показана на рисунке 7. Производится сравнение угла выхода излучения φ_S с φ_P и считается, что точка Р видима, если и только если $\varphi_P \geq \varphi_S$, допустив, что S видима. В противном случае, она затенена или не видима.

Угол входного излучения φ из какой-либо точки может быть получен из рисунка 5:

$$\varphi = \arcsin \left[\frac{z}{\rho} \left(1 - \frac{\rho^2}{4R_e^2} \right)^{1/2} - \frac{d}{2R_e} \right], \quad (23)$$

где:

$$R_e = k \cdot a;$$

k : фактический коэффициент при радиусе Земли, который зависит от градиента показателя преломления в атмосфере;

a : радиус Земли;

d : горизонтальное расстояние между антенной и контрольной точкой;

z : угол места контрольной точки по отношению к антенне;

$$\rho = (x^2 + y^2 + z^2)^{1/2}.$$

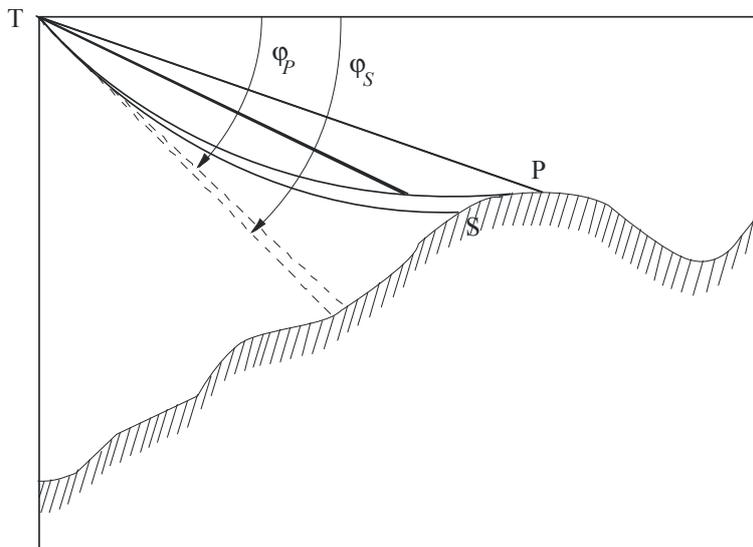
Поскольку дуга $\sin(x)$ представляет собой монотонно возрастающую функцию, то при определении видимости Р необходимо лишь сравнить аргументы арксинусной функции, учитывая, что S видима. Поскольку $\rho \ll R_e$, то критерий для точки Р, которая должна быть затенена точкой S, может быть сформулирован в следующем виде:

$$\frac{z_p}{\rho_p} - \frac{d_p}{2R_e} < \frac{z_s}{\rho_s} - \frac{d_s}{2R_e}. \quad (24)$$

В случае системы прямоугольных координат угол входного излучения φ_S в точке S можно определить путем линейной интерполяции:

РИСУНОК 7

Затенение контрольной точки Р



F.1096-07

$$\varphi_S = \frac{d_{QS}}{d_{QR}} \varphi_Q + \frac{d_{RS}}{d_{QR}} \varphi_R, \quad (25)$$

где:

- d_{QS} : расстояние между Q и S;
 d_{QR} : расстояние между Q и R;
 d_{RS} : расстояние между R и S.

При затенении исследование начинается с точек на сетке координат, которые ближе всего расположены от передатчика, и делается предположение, что они видимы. Затем производится отход от этих точек в концентрических прямоугольниках так, чтобы была охвачена вся сетка, и определяется затенение всех точек.

4.2 Микрозатенение

Микрозатенение элементарной площади определяется ее ориентацией. Рассмотрим элементарную треугольную площадь, представленную на рисунке 4. Этот треугольник считается микрозатененным, если и только если внешняя нормаль к его поверхности N и касательный единичный вектор r_0 соответствующего луча образуют острый угол. Это может быть представлено как:

$$N \cdot r_0 \geq 0. \quad (26)$$

Допустим, что z_a , z_b и z_c – углы места в трех соседних точках на сетке координат (см. рис. 4) и что, по крайней мере, одна из этих точек затенена. Вершины треугольника ABC, который приближается к элементу площади поверхности, могут быть определены по своим декартовым координатам: $A(x_b, y_b + \Delta y, z_a)$, $B(x_b, y_b, z_b)$, $C(x_b + \Delta x, y_b, z_c)$. Допустим, что $\angle abc = 90^\circ$. Тогда неравенство (26) эквивалентно (см. Примечание):

$$\begin{aligned} \delta [h(\sin \theta, \cos \theta) \cos(\varphi + 2\mu) - \Delta x \Delta y \sin(\varphi + 2\mu)] &\geq 0 \\ h(u, v) = u \cdot \Delta y \Delta z_{cb} + v \cdot \Delta x \Delta z_{ab} & \quad , \\ \delta = \text{sign}(\Delta x \Delta y) & \end{aligned} \quad (27)$$

где φ – угол входного излучения, μ – разница между углом входного излучения и углом места, а θ – азимут рассеивающего объекта. Одна половина абсолютного значения левой части этого неравенства равна фактической площади рассеивающего объекта, как это следует из уравнения (8). Поэтому при расчете элементарной помехи рассеяния можно оценить левую часть выражения (27) и использовать ее также для микрозатенения.

В Приложении 3 приводится упрощенный метод аппроксимации для определения микрозатенения и оценки B_e , фактической площади элементарного треугольника. Этот метод сокращает время расчетов за счет использования аппроксимации первого порядка в φ для уравнений (11) и (27). Он может использоваться в тех случаях, когда углы входного излучения по отношению к области, находящейся вблизи пересечения главных лучей мешающей антенны и антенны, испытывающей помехи, не превышают приблизительно 5° . В этом случае внесенные ошибки составляют менее 10%.

Примечание Директора БР. – В порядке информации сообщается, что выведение этой оценки приводится в:

KAHN, A.L., PRABHU, V.K. and TURIN, W. [1991] Shadowing algorithms in estimating ground scatter interference. Conf. Record, IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM '91).

Приложение 2

Расчет площади четырехугольника на единичной сфере

Площадь четырехугольника, D_0 , дается формулой:

$$D_0 = A_1 + A_2 + A_3 + A_4 - 2\pi, \quad (28)$$

где A_1, A_2, A_3 и A_4 – углы четырехугольника на единичной сфере.

Угол A_i равен углу между плоскостями, содержащими центр сферы, и большими окружностями, образующими это угол. Этот угол может быть получен из уравнения:

$$\cos A_i = \frac{N_j \cdot N_k}{N_j \cdot N_k}, \quad (29)$$

где N_j и N_k – нормали плоскостей, N_j и N_k – их длины. Эти векторы даны векторным произведением радиус-векторов соответствующих точек на поверхности сферы. Например, обозначив радиус-вектор вершины A_i как r_i ,

$$\cos A_2 = \frac{(r_2 \times r_1) \cdot (r_3 \times r_2)}{|r_2 \times r_1| \cdot |r_3 \times r_2|}. \quad (30)$$

Чтобы вывести уравнения в явном виде, возьмем декартовы и сферические координаты с исходной точкой в центре сферы, тогда радиус-вектор точки A_i на единичной сфере может быть выражен как:

$$r_i = \{\cos \varphi_i \sin \theta_i, \cos \varphi_i \cos \theta_i, \sin \varphi_i\}. \quad (31)$$

Векторное произведение этих векторов равно:

$$r_{ij} = r_i \times r_j = \{x_{ij}, y_{ij}, z_{ij}\}, \quad (32)$$

где:

$$\begin{aligned} x_{ij} &= \cos \varphi_i \cos \theta_i \sin \varphi_j - \cos \varphi_j \cos \theta_j \sin \varphi_i \\ y_{ij} &= \cos \varphi_j \sin \theta_j \sin \varphi_i - \cos \varphi_i \cos \theta_i \sin \varphi_j \\ z_{ij} &= \cos \varphi_i \sin \theta_i \cos \varphi_j \cos \theta_j - \cos \varphi_j \sin \theta_j \cos \varphi_i \cos \theta_i. \end{aligned} \quad (33)$$

Скалярное произведение векторных произведений в уравнении (30) задается формулой:

$$r_{ij} \cdot r_{kl} = x_{ij} x_{kl} + y_{ij} y_{kl} + z_{ij} z_{kl}, \quad (34)$$

а длина вектора:

$$r_{ij} = (x_{ij}^2 + y_{ij}^2 + z_{ij}^2)^{1/2}. \quad (35)$$

Приложение 3

Альтернативный метод расчета фактической площади и микрозатенения

Для небольших углов входного излучения и отклонений по азимуту в пределах треугольной области, как показано на рисунке 4, микрозатенение может быть определено приблизительно путем первоначального сортирования вершин треугольников по азимуту: $P_1(\rho_1, \varphi_1, \theta_1)$, $P_2(\rho_2, \varphi_2, \theta_2)$, $P_3(\rho_3, \varphi_3, \theta_3)$:

$$\theta_1 \leq \theta_2 \leq \theta_3. \quad (36)$$

Используя линейную интерполяцию, определяем координаты точки P_x , которая лежит на азимуте θ_2 , на линии, соединяющей P_1 и P_3 . Если точка P_2 лежит дальше от антенны, чем точка P_x , а ее угол места меньше, чем у точки P_x , то эта площадь микрозатенена. Аналогичным образом, площадь микрозатенена, если точка P_2 расположена ближе к антенне, чем точка P_x , а ее угол места больше, чем у точки P_x .

Определяем угол места точки P_2 минус угол места точки P_x , как у $\Delta\varphi$, а также величину, на которую расстояние точки P_2 от антенны, превышает расстояние P_x как $\Delta\rho$. Ячейка микрозатенена, если:

$$\Delta\rho \cdot \Delta\varphi \leq 0, \quad (37)$$

где:

$$\Delta\rho = \rho_2 - \rho_1 \frac{\theta_3 - \theta_2}{\theta_3 - \theta_1} - \rho_3 \frac{\theta_2 - \theta_1}{\theta_3 - \theta_1}, \quad (38)$$

$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 \frac{\theta_3 - \theta_2}{\theta_3 - \theta_1} - \varphi_3 \frac{\theta_2 - \theta_1}{\theta_3 - \theta_1}.$$

Фактическая расчетная площадь треугольника может быть аппроксимирована уравнением:

$$B_e = \frac{\rho^2 \cos \varphi}{2} |\Delta A|, \quad (39)$$

где ρ – расстояние от антенны до элементарного треугольника, и:

$$\Delta A = (\theta_3 - \theta_1) \Delta\varphi. \quad (40)$$

Таким образом, значение $\Delta\varphi$ может быть использовано не только для микрозатенения, но и для оценки расчетной площади. Следует отметить, что поскольку θ измерено по модулю 2π , а элементарные треугольники имеют малую протяженность по азимуту, то любая разность $\theta_i - \theta_j$ в уравнениях (38) и (40) должна быть сокращена на 2π , если она превышает π .