|  |
| --- |
| **Рекомендация МСЭ-R P.834-7**  **(10/2015)** |
| **Влияние тропосферной рефракции на распространение радиоволн** |
| **Серия P**  **Распространение радиоволн** |

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

|  |  |
| --- | --- |
| **Серии Рекомендаций МСЭ-R**  (Представлены также в онлайновой 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** | Подвижные службы, служба радиоопределения, любительская служба и относящиеся к ним спутниковые службы |
| **P** | **Распространение радиоволн** |
| **RA** | Радиоастрономия |
| **RS** | Системы дистанционного зондирования |
| **S** | Фиксированная спутниковая служба |
| **SA** | Космические применения и метеорология |
| **SF** | Совместное использование частот и координация между системами фиксированной спутниковой службы и фиксированной службы |
| **SM** | Управление использованием спектра |
| **SNG** | Спутниковый сбор новостей |
| **TF** | Передача сигналов времени и эталонных частот |
| **V** | Словарь и связанные с ним вопросы |

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

*Электронная публикация*Женева, 2015 г.

© ITU 2015

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 P.834-7

Влияние тропосферной рефракции на распространение радиоволн

(Вопрос МСЭ-R 201/3)

(1992-1994-1997-1999-2003-2005-2007-2015)

Сфера применения

В Рекомендации МСЭ-R P.834 предоставляются методы расчета крупномасштабных рефракционных явлений в атмосфере, включая отклонение луча, волноводные слои, эквивалентный радиус Земли, видимый угол места и углы направления максимума излучения на трассах Земля-космос и эффективную длину радиотрассы.

Ассамблея радиосвязи МСЭ,

учитывая,

*a)* что для надлежащего планирования наземных линий связи и линий связи Земля-космос необходимы соответствующие процедуры расчетов для оценки влияния рефракции на радиосигналы;

*b)* что были разработаны процедуры, позволяющие количественно оценить некоторые рефракционные эффекты при распространении радиосигналов по наземным линиям связи и линиям связи Земля-космос,

рекомендует,

**1** чтобы при расчете влияния крупномасштабных рефракционных явлений обязательно использовалась информация, представленная в Приложении 1.

Приложение 1

# 1 Отклонение луча

Радиолуч, проходя через нижний (неионизированный) слой атмосферы, претерпевает отклонение, вызванное наличием градиента индекса рефракции. Поскольку величина индекса рефракции меняется главным образом по высоте, то, как правило, рассматривают только его вертикальный градиент. Поэтому кривизна луча в точке происходит в вертикальной плоскости и выражается уравнением:

, (1)

где:

 : радиус кривизны траектории луча;

*n* : индекс рефракции в атмосфере;

d*n*/d*h* : вертикальный градиент индекса рефракции;

*h* : высота точки над поверхностью Земли;

 : угол траектории луча относительно горизонтальной плоскости в рассматриваемой точке.

Такая кривизна луча определяется как положительная, если отклонение луча направлено к поверхности Земли. Это явление фактически не зависит от частоты, если на расстоянии, равном длине волны, градиент индекса рефракции меняется незначительно.

# 2 Эквивалентный радиус Земли

Если трасса является почти горизонтальной, величина  близка к нулю. Однако так как *n* очень близок к единице, уравнение (1) упрощается следующим образом:

. (2)

Поэтому очевидно, что если вертикальный градиент является постоянным, то траектории представляют собой дуги круга.

Если высотный профиль изменения рефракции линеен, т. е. градиент рефракции остается постоянным вдоль траектории луча, возможно преобразование, которое позволяет рассматривать распространение как прямолинейное. Это преобразование предполагает, что распространение происходит над гипотетической Землей с эквивалентным радиусом *Re*  *ka* при:

, (3)

где *a* – фактический радиус Земли, а *k* – коэффициент эквивалентного радиуса Земли (*k*-фактор). В результате такого геометрического преобразования траектории лучей становятся линейными независимо от угла места.

Строго говоря, градиент рефракции остается постоянным, только если трасса горизонтальна. На практике для высот менее 1000 м экспоненциальную модель усредненного профиля индекса рефракции (см. Рекомендацию МСЭ-R P.453) можно заменить линейной. Соответствующий *k‑*фактор *k*  4/3.

# 3 Модифицированный индекс рефракции

Для некоторых применений, например при построении траектории луча, используется модифицированный индекс рефракции или модуль рефракции, который определен в Рекомендации МСЭ-R P.310. Модуль рефракции, *M*, определяется уравнением:

, (4)

где *h* – высота рассматриваемой точки в метрах, а *a* – радиус Земли, выраженный в тысячах километров. С помощью этого преобразования распространение можно свести к распространению над плоской Землей в атмосфере, преломляющая способность которой равна модулю рефракции *M*.

# 4 Видимый угол направления максимума излучения на наклонных трассах

## 4.1 Введение

При исследовании вопросов, связанных с совместным использованием частот, необходимо определять видимый угол места космической станции с учетом атмосферной рефракции. Ниже приводится соответствующий метод расчета.

## 4.2 Видимость космической станции

Как описано выше в п. 1, радиолуч, излучаемый станцией, находящейся на поверхности Земли (на высоте *h* (км) и имеющей угол места (градусов)), будет под влиянием атмосферной рефракции изгибаться в сторону Земли. Поправка на рефракцию,  (в градусах), вычисляется с помощью следующего интеграла:

, (5)

где определяется в полярных координатах на основе закона Снеллиуса следующим образом:

 (6)

 (7)

*r* : радиус Земли (6370 км);

*x* : высота (км).

Поскольку отклонение луча в значительной степени определяется нижней частью атмосферы, для обычной атмосферы индекс рефракции на высоте *x* можно определить по формуле:

, (8)

где:

*a*  0,000315;

*b*  0,1361.

Эта модель основана на использовании экспоненциальной модели атмосферы для распространения по наземным трассам, которая приведена в Рекомендации МСЭ-R P.453. Кроме того, *n'*(*x*) является производной от *n*(*x*), т. е. *n'*(*x*)  –*ab* exp (–*bx*).

Значения  (*h*, ) (в градусах) рассчитывались для условий эталонной атмосферы, при этом оказалось, что следующая числовая формула обеспечивает хорошую аппроксимацию:

(*h*, )  1/[1,314  0,6437  0,02869 2  *h* (0,2305  0,09428  0,01096 2)  0,008583 *h*2]. (9)

Приведенная выше формула была получена в качестве аппроксимации для 0  *h*  3 км и   
*m*    10, где *m* – угол, под которым радиолуч пересекается с земной поверхностью   
и который определяется как:

 (10)

или, приблизительно,   (градусы).

Уравнение (9) дает также вполне приемлемую аппроксимацию в диапазоне 10    90.

Пусть угол места космической станции в условиях распространения в свободном пространстве будет равен 0 (градусы), а минимальный угол места от станции на поверхности Земли, для которого радиолуч не пересекается с земной поверхностью, – *m*. Поправка на рефракцию, соответствующая *m*, будет равна  (*h*, *m*). Следовательно, космическая станция будет видима лишь в том случае, если выполняется неравенство:

. (11)

## 4.3 Определение видимого угла места

Если неравенство в уравнении (11) выполняется, то видимый угол места,  (градусы), можно определить с учетом атмосферной рефракции, решив следующее уравнение:

. (12)

Решение уравнения (12) имеет вид:

, (13)

где значения *s* (*h*, 0) идентичны значениям (*h*, ), но выражены в виде функции 0.

Функция *s* (*h*, 0) (градусы) хорошо аппроксимируется следующей числовой формулой:

τ*s* (*h*, θ0)    1/[1.728  0.5411 θ0  0.03723 θ02  *h* (0.1815  0.06272 θ0   
              0.01380 θ02)  *h*2 (0.01727  0.008288 θ0)] (14)

Значение , рассчитанное с помощью уравнения (13), и будет видимым углом места.

## 4.4 Основные этапы вычислений

*Этап 1*: Угол места космической станции в условиях распространения в свободном пространстве обозначается как 0.

*Этап 2*: С помощью уравнений (9) и (10) проверить, выполняется ли уравнение (11). Если оно не выполняется, то спутник невидим, и, следовательно, дальнейшие вычисления не требуются.

*Этап 3*: Если ответ на этапе 2 положительный, то с помощью уравнений (13) и (14) рассчитывается .

## 4.5 Результаты измерения видимого угла направления максимума излучения

В таблице 1 представлены средние значения угловой девиации при распространении радиоволн через атмосферу в целом. В ней суммированы экспериментальные данные, полученные с помощью радиолокационных методов, и измерения, в которых использовались радиометр и радиотелескоп. Вокруг этого видимого угла места будут иметь место флуктуации из-за локальных изменений структуры индекса рефракции.

ТАБЛИЦА 1

Величины угловой девиации при распространении радиоволн через атмосферу в целом

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Угол места,  (градусы) | Средняя общая угловая девиация,  (градусы) | | | |
| Полярный континентальный воздух | Умеренный континентальный воздух | Умеренный морской  воздух | Тропический морской  воздух |
| 1 2 4 10 20 30 | 0,45 0,32 0,21 0,10 | – 0,36 0,25 0,11 0,05 0,03 | – 0,38 0,26 0,12 0,06 0,04 | 0,65 0,47 0,27 0,14 |
|  | Колебания величины  ото дня ко дню (только для столбцов 1 и 4) | | | |
| 1 10 | 0,1 среднеквадратичное значение 0,007 среднеквадратичное значение | | | |

# 5 Фокусировка и расфокусировка волны при распространении через атмосферу

Изменения уровня сигнала могут быть следствием расширения или сужения луча антенны, которые вызываются изменением атмосферной рефракции в зависимости от угла места. Данное явление не должно быть существенным при углах места больших 3°.

Уравнение ниже может быть использовано с целью расчета потерь сигнала, вызванных эффектами рефракции, для волны, проходящей через атмосферу в целом:

,

где:



θ0: угол места линии, соединяющей передающий и приемный пункты, в градусах (θ0 < 10°);

*h*:высота самой низкой точки над уровнем моря, в км (*h* < 3 км);

*b*: изменение уровня сигнала для волны, проходящей через атмосферу, по сравнению с условиями свободного пространства, в децибелах;

знак *b* в уравнении будет отрицательным ("–") для источника передачи, расположенного вблизи поверхности Земли, и положительным ("+") для источника, расположенного за пределами атмосферы.

# 6 Увеличение длины радиотрассы и ее изменения

Поскольку индекс тропосферной рефракции больше единицы и изменяется в зависимости от высоты, протяженность радиотрассы при распространении волн между поверхностью Земли и спутником превышает геометрическую длину трассы. Эту разницу в длине можно определить с помощью следующего интеграла:

, (15)

где:

*s* : расстояние вдоль трассы;

*n* : индекс рефракции;

*A* и *B* : концы трассы.

Уравнение (15) можно использовать лишь в том случае, когда известны изменения индекса рефракции *n* вдоль трассы.

Если температура, *T*, атмосферное давление, *P*, и относительная влажность, *H*, на уровне поверхности Земли известны, то увеличение длины трассы *L* можно вычислить с помощью полуэмпирического метода, о котором речь пойдет ниже и который был выведен с использованием профилей, полученных с помощью радиозондирования атмосферы, на основе данных, собранных на 500 метеорологических станциях в течение одногодичной кампании 1979 года. В основе этого метода лежит следующее уравнение для определения увеличения длины трассы *L*:

, (16)

где:

0 : угол места в точке наблюдения;

*LV* : увеличение длины трассы по вертикали;

*k* и  (0, *LV*) : поправочные коэффициенты, при вычислении которых используется экспоненциальная модель атмосферы.

Изменения угла места на трассе учитываются с помощью коэффициента *k*. Член  (0, *LV*) отражает влияние рефракции (трасса не является прямой линией). Этот член всегда очень мал по величине, за исключением тех случаев, когда угол места очень мал, а потому им можно пренебречь в вычислениях; это приводит к погрешности всего лишь 3,5 см для угла 0 порядка 10 и 0,1 мм для угла 0 порядка 45. Кроме того, можно заметить, что при очень низких углах места, когда нельзя пренебречь членом , допущение относительно плоской стратифицированной атмосферы, лежащее в основе всех методов расчета увеличения длины трассы, более не действительно.

Увеличение длины трассы по вертикали (м) описывается уравнением:

*LV*  0.00227 *P*  *f* (*T*) *H* (17)

В первом члене правой части уравнения (17) *P* – атмосферное давление (гПа) в точке наблюдения.

Во втором члене, который получен эмпирическим путем, *H* – относительная влажность (%); функция температуры *f*(*T*) зависит от географического местоположения и имеет следующий вид:

*f* (*T*)  *a* 10*bT*, (18)

где:

T выражена в C ;

a выражена в м/% относительной влажности;

b выражена в C–1.

Параметры *a* и *b* в зависимости от географического местоположения приведены в таблице 2.

ТАБЛИЦА 2

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Местоположение | *a* (м/%) | *b* (C–1) |
| Прибрежные районы (острова или пункты, удаленные менее чем на 10 км от берега моря) | 5,5  10–4 | 2,91  10–2 |
| Неприбрежные экваториальные районы | 6,5  10–4 | 2,73  10–2 |
| Все прочие районы | 7,3  10–4 | 2,35  10–2 |

При вычислении поправочного коэффициента *k*, входящего в уравнение (16), делается предположение об экспоненциальном законе изменения атмосферной рефракции *N* в зависимости от высоты *h*:

*N*(*h*)  *Ns* exp (– *h* / *h*0), (19)

где *Ns* – среднее значение рефракции у поверхности Земли (см. Рекомендацию МСЭ-R P.453), а *h*0 определяется как:

 (20)

Тогда *k* вычисляется с помощью следующего выражения:

, (21)

где *ns* и *n*(*h*0) – значения индекса рефракции вблизи поверхности Земли и на высоте *h*0 (определяемые из уравнения (20)), соответственно, а *rs* и *r*(*h*0) – соответствующие расстояния до центра Земли.

Для трасс Земля-космос с углами места увеличение длины трассы в тропосфере *L*(**) (м) можно представить в виде суммы "гидростатической" и "влажной" составляющих *LH*(**) и *LW*(**).

Увеличение длины трассы вдоль вертикальной трассы, *LHv* и *LWv*, можно спроецировать на угол места *θ* более 3используя две отдельные функции численного картирования для гидростатической и влажной составляющих, *mH*(**) и *mW*(**):

 м (22)

Гидростатическую вертикальную составляющую на поверхности Земли, *LHvs*, можно получить, используя следующее уравнение:

 м (22а)

Влажную вертикальную составляющую на поверхности Земли, *LWvs*, можно получить, используя следующее уравнение:

 м (22b)

где:

*ps*, *es*: общее давление воздуха и частичное давление водяного пара у поверхности Земли (гПа);

*Tms*: средняя температура столба водяного пара над поверхностью (K);

λ: коэффициент уменьшения давления пара;

*Rd*: *R*/*Md* = 287,0 (Дж/кг K);

*R*: молярная постоянная газа = 8,314 (Дж/мол K);

*Md*: молярная масса сухого воздуха = 28,9644 (г/мол);

*k*1 = 77,604 (K/гПа);

*k*2 = 373 900 (K2/гПа);

*gms= gm(hs)*

*gm*(*h*)=9,784 ⋅ (1 – 0,00266 ⋅ cos (2 ⋅ lat) – 0,00028 ⋅ *h*) = ускорение силы тяжести в центре массы воздуха с высоты h (м/с2);

*lat*: широта местоположения (радианы);

*hs*: высота поверхности Земли над средним уровнем моря (н.с.у.м., км).

Для приемников, расположенных на высоте h (км), отличающейся от высоты поверхности, *hs*, гидростатическая и влажная вертикальные составляющие, *LHv*(*h*) и *LWv*(*h*), задаются уравнениями:

 м (23a)

 м (23b)

где:

значения входных метеорологических параметров на высоте *h*, *Tm*(*h*), *e*(*h*) и *p*(*h*), могут быть получены из значений на поверхности Земли, *Tms*, *es* и *ps*, если использовать следующие уравнения:

 K (24a)

 гПа (24b)

 гПа, (24c)

где:

*m* = вертикальный градиент средней температуры водяного пара с поверхности Земли (K/км).

T*s* = температура воздуха на поверхности Земли (K) = 

α = вертикальный градиент температуры воздуха (K/км) = 

 = Rd /1000 = 0,287                Дж/(г К)

*g* = ускорение силы тяжести на поверхности Земли [м/с2] = 

Все входные параметры модели, *ps*, *es*, *Tms*, λ и α*m*, могут быть получены исходя из предположения, что метеорологические параметры характеризуются сезонной флуктуацией.

, (25)

где:

*Xi*: *ps*, *es*, *Tms*,  или *m*; Индекс i, 1 обозначает *ps*, 2 обозначает *es*, 3 обозначает *Tms*, 4 обозначает и 5 обозначает *m*

*a*1*i*: среднее значение параметра*;*

*a*2*i*: сезонная флуктуация параметра;

*a*3*i*: день минимального значения параметра;

*Dy:* день года (1, 2 ..., 365,25), 1 = 1 января, 32 = 1 февраля, 60,25 = 1 марта.

Коэффициенты *a*1, *a*2 и *a*3 параметров *ps*, *es*, *Tms*, λ и α*m*, а также величина эталонной высоты *href*, по которым рассчитываются эти коэффициенты, являются неотъемлемой частью этой Рекомендации и представлены в форме цифровых карт, содержащихся в файле R-RECP.834-7-201504-I!!ZIP-E.

Данные представлены для значений долготы от 0 до 360 и широты от 90 до –90, разрешение по широте и долготе составляет 1,5°. Величину увеличения длины трассы в любом желаемом местоположении и на любой высоте над поверхностью *h,* можно получить с помощью следующего метода:

a) Определить с помощью карт коэффициенты *a*1i, *a*2i и *a*3i пяти параметров *ps*, *es*, *Tms*, λ, α*m* и эталонную высоту *href*, в ближайших к желаемому местоположению четырех точках сетки.

b) Рассчитать значения пяти параметров, *ps*, *es*, *Tms*, λ или α*m* на эталонной высоте *href* на день года *D*y, , ,  и  в ближайших к желаемому местоположению четырех точках сетки, используя уравнение 25 с коэффициентами *a*1i, *a*2i и *a*3i каждой точки сетки.

c) Рассчитать значения трех параметров, *p*(*h*), *e*(*h*) и *Tm*(*h*), на высоте *h* в ближайших к желаемому местоположению четырех точках сетки, используя уравнения 24a, 24b и 24c со значениями , ,  и  , и со значениями *href* каждой точки сетки.

d) Рассчитать значения *LHv*(*h*) и *LWv*(*h*) на высоте *h* в ближайших к желаемому местоположению четырех точках сетки, используя уравнения 23a и 23b со значениями *p*(*h*), *e*(*h*) и *Tm*(*h*) каждой точки сетки.

e) Рассчитать значения высоты *h* параметров *LHv*(*h*) и *LWv*(*h*) в желаемом местоположении с помощью билинейной интерполяции четырех значений *LHv*(*h*) и *LWv*(*h*) в четырех точках сетки, как описывается в Рекомендации МСЭ-R P.1144.

f) Рассчитать значение тропосферного увеличения длины трассы на высоте *h* в желаемом местоположении, *L*(*h,*), используя уравнение 22.

Точность предлагаемой модели была проверена с использованием радиозонда, измерений в рамках системы ГНСС и радиометрических измерений, чтобы определить *L*vs и уровень погрешности оказался в пределах от 2 до 6 см по всему миру. Если необходима более высокая точность, то в качестве входных данных в модели могут использоваться совместные локальные измерения общего давления воздуха и давления водяных паров.

Функция отображения гидростатической и влажной составляющих, *mh*(**) и *mw*(**), получается с помощью следующих уравнений:

 (26a)

, (26b)

где:



*b*h = 0,0029

*b*w = 0,00146

*c*w = 0,04391

 (26c)

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Полушарие | c1 | c10 | c11 | *ψ* |
| Северное | 0,062 | 0,001 | 0,005 | 0 |
| Южное | 0,062 | 0,002 | 0,007 | π |

 (26d)

 (26e)

Коэффициенты *A0h,, A1h, A2h, B1h, B2h, A0w,, A1w, A2w, B1w* и *B2w,* являются неотъемлемой частью настоящей Рекомендации и представлены в виде цифровых карт в файле R-RECP.834-7-201504-I!!ZIP-E.ZIP. Рассчитать значения параметров *ah* и *aw* в желаемом местоположении с помощью билинейной интерполяции четырех значений этих коэффициентов в четырех точках сетки, как описывается в Рекомендации МСЭ-R P.1144.

Что касается линии связи Земля-космос с углами места, *θ*, более чем 20°, то функции отображения, получаемые с помощью уравнений (26a) и (26b), могут быть приблизительно выражены уравнением:

 (26f)

При применении этой модели рекомендуется использовать либо уравнения (26a) и (26b), либо уравнение (26f) последовательно по всем углам места.

РИСУНОК 1

Карты средней дополнительной задержки на трассе для эталонного уровня в январе и июле



# 7 Распространение при наличии волноводных слоев

Волноводы возникают в тех случаях, когда величина вертикального градиента рефракции на данной высоте и для данного местоположения становится меньше ‑157 N/км.

Существование волноводов является очень важным фактором, поскольку они могут способствовать возникновению аномальных условий распространения, особенно на наземных линиях связи или линиях связи Земля–космос с очень небольшими углами места. Волноводы создают такой механизм распространения радиосигналов достаточно высокой частоты далеко за пределы их обычной прямой видимости, что является причиной возможных помех для других служб (см. Рекомендацию   
МСЭ-R P.452). Кроме того, они играют важную роль с точки зрения возникновения многолучевой интерференции (см. Рекомендацию МСЭ-R P.530), хотя их наличие не является ни необходимым, ни достаточным условием для возникновения многолучевого распространения на отдельной линии.

## 7.1 Влияние угла места

Когда передающая антенна расположена в пределах горизонтально стратифицированного радиоволновода, лучи, выходящие под очень небольшими углами места, могут быть "захвачены" в границы волновода. Для упрощенного случая, когда речь идет о "нормальном" профиле рефракции над приземным волноводом с постоянным градиентом рефракции, предельный угол места  (рад), при котором лучи могут быть захвачены в волновод, определяется выражением:

, (27)

где d*M*/d*h* – вертикальный градиент модифицированной рефракции , а *h* – толщина волновода, которая представляет собой высоту его верхней границы над передающей антенной.

На рисунке 2 показан максимальный угол места, при котором лучи могут быть захвачены волноводом. Максимальный угол захвата быстро увеличивается при уменьшении градиентов рефракции ниже уровня –157 N/км (то есть при увеличении вертикальных градиентов) и при увеличении толщины волновода.

## 7.2 Минимальная частота захвата

Существование волновода, даже наиболее благоприятным образом расположенного, не обязательно означает, что электромагнитная энергия сигнала будет сосредоточена внутри него, обеспечивая таким образом распространение на большие расстояния. Помимо того, что должно выполняться условие максимального угла места, о котором говорилось выше, частота сигнала должна быть выше некоего критического значения, определяемого физической толщиной волновода и профилем рефракции. Ниже этой минимальной частоты захвата все больше электромагнитной энергии будет утекать за пределы волновода.

Минимальную частоту захвата сигнала тропосферным волноводом можно рассчитать с помощью фазового интеграла. На рисунке 3 представлены минимальные значения частоты захвата для приземных волноводов (сплошные кривые), где допускается постоянный (отрицательный) градиент рефракции от поверхности Земли до заданной высоты и со стандартным профилем рефракции выше этой высоты. Для частот, используемых наземными системами (обычно 8–16 ГГц), минимальная толщина волноводного слоя должна быть приблизительно от 5 до 15 м, и в этих случаях минимальная частота захвата, *fmin*, в значительной мере зависит как от толщины волновода, так и от градиента индекса рефракции.

В случае приподнятых волноводов, даже когда рассматривается простой линейный профиль рефракции, вводится дополнительный параметр. Этот параметр описывает форму профиля индекса рефракции подлежащего слоя. На рисунке 3 штриховые линии показывают минимальную частоту захвата для волноводного слоя с постоянным градиентом, расположенного над поверхностным слоем со стандартным градиентом рефракции, равным –40 N/км.

РИСУНОК 2

Максимальный угол захвата для поверхности волновода с постоянным  
градиентом рефракции над сферической Землей



Для слоев, имеющих вертикальные градиенты изменения рефракции лишь немногим больше минимальной величины, необходимой для возникновения волновода, минимальная частота захвата фактически больше, чем для эквивалентного поверхностного волновода. Однако при наличии очень высоких градиентов волновода захват сигнала приподнятым волноводом для любой заданной частоты происходит при значительно меньшей толщине слоя по сравнению с поверхностным волноводом, имеющим такой же градиент.

РИСУНОК 3

Минимальная частота захвата сигнала в атмосферные радиоволны  
с постоянными градиентами рефракции

