

РЕКОМЕНДАЦИЯ МСЭ-R P.834-5

Влияние тропосферной рефракции на распространение радиоволн

(Вопрос МСЭ-R 201/3)

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

Ассамблея радиосвязи МСЭ,

учитывая,

- а) что для надлежащего планирования наземных линий связи и линий связи Земля–космос необходимы соответствующие процедуры расчетов для оценки влияния рефракции на радиосигналы;
- б) 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 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:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{\cos \varphi}{n} \frac{dn}{dh}, \quad (1)$$

где:

- ρ : радиус кривизны траектории луча;
- n : индекс рефракции в атмосфере;
- dn/dh : вертикальный градиент индекса рефракции;
- h : высота точки над поверхностью Земли;
- φ : 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 ϕ близка к нулю. Однако, так как n очень близок к единице, уравнение (1) упрощается следующим образом:

$$\frac{1}{\rho} = -\frac{dn}{dh} \quad (2)$$

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

Если высотный профиль изменения рефракции линейен, то есть 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 $R_e = k a$, при:

$$\frac{1}{ka} = \frac{1}{a} + \frac{dn}{dh} = \frac{1}{R_e}, \quad (3)$$

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:

$$M = N + \frac{h}{a}, \quad (4)$$

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 θ (градусов)), будет под влиянием атмосферной рефракции изгибаться в сторону Земли. Поправка на рефракцию, τ (в градусах), вычисляется с помощью следующего интеграла:

$$\tau = -\int_h^{\infty} \frac{n'(x)}{n(x) \cdot \tan\phi} dx, \quad (5)$$

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

$$\cos \varphi = \frac{c}{(r+x) \cdot n(x)} \quad (6)$$

$$c = (r+h) \cdot n(h) \cdot \cos \theta \quad (7)$$

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:

$$n(x) = 1 + a \cdot \exp(-bx), \quad (8)$$

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 $n(x)$, то есть $n'(x) = -ab \exp(-bx)$.

Значения $\tau(h, \theta)$ (в градусах) рассчитывались для условий эталонной атмосферы, при этом оказалось, что следующая числовая формула обеспечивает хорошую аппроксимацию:

$$\tau(h, \theta) = 1/[1,314 + 0,6437 \theta + 0,02869 \theta^2 + h(0,2305 + 0,09428 \theta + 0,01096 \theta^2) + 0,008583 h^2] \quad (9)$$

Приведенная выше формула была получена в качестве аппроксимации для $0 \leq h \leq 3$ км и $\theta_m \leq \theta \leq 10^\circ$, где θ_m – угол, под которым радиолуч пересекается с земной поверхностью и который определяется как:

$$\theta_m = -\arccos \left(\frac{r}{r+h} \cdot \frac{n(0)}{n(h)} \right) \quad (10)$$

или, приблизительно, $\theta_m = -0,875\sqrt{h}$ (градусы).

Уравнение (9) дает также вполне приемлемую аппроксимацию в диапазоне $10^\circ < \theta \leq 90^\circ$.

Пусть угол места космической станции в условиях распространения в свободном пространстве будет равен θ_0 (градусы), а минимальный угол места от станции на поверхности Земли, для которого радиолуч не пересекается с земной поверхностью, – θ_m . Поправка на рефракцию, соответствующая θ_m , будет равна $\tau(h, \theta_m)$. Следовательно, космическая станция будет видима лишь в том случае, если выполняется неравенство:

$$\theta_m - \tau(h, \theta_m) \leq \theta_0 \quad (11)$$

4.3 Определение видимого угла места

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

$$\theta - \tau(h, \theta) = \theta_0 \quad (12)$$

Решение уравнения (12) имеет вид:

$$\theta = \theta_0 + \tau_s(h, \theta_0), \quad (13)$$

где значения $\tau_s(h, \theta_0)$ идентичны значениям $\tau(h, \theta)$, но выражены в виде функции θ_0 .

Функция $\tau_S(h, \theta_0)$ (градусы) хорошо аппроксимируется следующей числовой формулой:

$$\tau_S(h, \theta_0) = 1/[1,728 + 0,5411 \theta_0 + 0,03723 \theta_0^2 + h(0,1815 + 0,06272 \theta_0 + 0,01380 \theta_0^2) + h^2(0,01727 + 0,008288 \theta_0)] \quad (14)$$

Значение θ , 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 θ_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 θ .

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

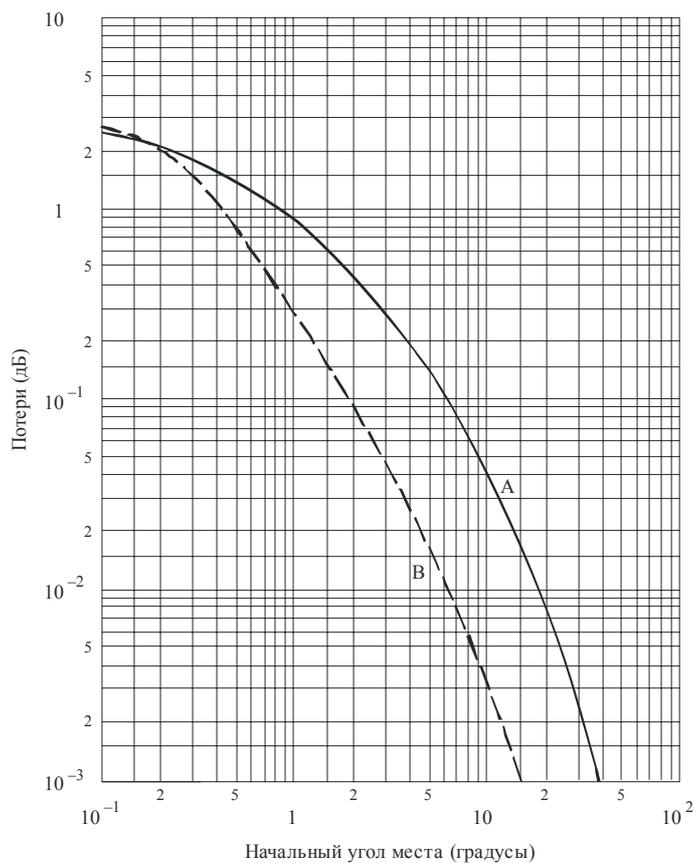
Угол места, θ (градусы)	Средняя общая угловая девиация, $\Delta\theta$ (градусы)			
	Полярный континентальный воздух	Умеренный континентальный воздух	Умеренный морской воздух	Тропический морской воздух
1	0,45	–	–	0,65
2	0,32	0,36	0,38	0,47
4	0,21	0,25	0,26	0,27
10	0,10	0,11	0,12	0,14
20		0,05	0,06	
30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

5 Расширение луча на наклонных трассах

Потери сигнала могут также быть вызваны дополнительным расширением луча антенны, вызванным изменением атмосферной рефракции в зависимости от угла места. Этим явлением можно пренебречь при всех углах места более 3° . На рисунке 1 показаны оценки потерь при прохождении через всю атмосферу, обусловленных влиянием атмосферной рефракции. Потери не должны зависеть от частоты в диапазоне от 1 до 100 ГГц, где на профиль индекса рефракции оказывает влияние водяной пар.

РИСУНОК 1

Потери из-за дополнительного расширения луча и стандартное отклонение от средней величины



Кривые А: средние потери
В: стандартное отклонение

0834-01

6 Эффективная длина радиотрассы и ее изменения

Поскольку индекс тропосферной рефракции больше единицы и меняется 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:

$$\Delta L = \int_A^B (n - 1) ds, \quad (15)$$

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 ΔL будет вычисляться с помощью полуэмпирического метода, о котором речь пойдет ниже и который был разработан 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 ΔL :

$$\Delta L = \frac{\Delta L_V}{\sin \varphi_0 (1 + k \cot^2 \varphi_0)^{1/2}} + \delta(\varphi_0, \Delta L_V), \quad (16)$$

где:

φ_0 : угол места в точке наблюдения;

ΔL_V : увеличение длины трассы по вертикали;

k и $\delta(\varphi_0, \Delta L_V)$: поправочные коэффициенты, при вычислении которых используется экспоненциальная модель атмосферы.

Изменения угла места на трассе учитываются с помощью коэффициента k . Член $\delta(\varphi_0, \Delta L_V)$ 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 φ_0 порядка 10° и 0,1 мм для угла при φ_0 порядка 45° . Кроме того, можно заметить, что при очень низких углах места, когда нельзя пренебречь членом δ , допущение относительно плоской стратифицированной атмосферы, лежащее в основе всех методов расчета увеличения длины трассы, более недействительно.

Увеличение длины трассы по вертикали (м) описывается уравнением:

$$\Delta L_V = 0,00227 P + f(T) H \quad (17)$$

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

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

$$f(T) = a 10^{bT}, \quad (18)$$

где:

T выражена в $^\circ\text{C}$;

a выражена в м/% относительной влажности;

b выражена в $^\circ\text{C}^{-1}$.

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

ТАБЛИЦА 2

Местоположение	a (м/%)	b ($^\circ\text{C}^{-1}$)
Прибрежные районы (острова или пункты, удаленные менее чем на 10 км от берега моря)	$5,5 \times 10^{-4}$	$2,91 \times 10^{-2}$
Не прибрежные экваториальные районы	$6,5 \times 10^{-4}$	$2,73 \times 10^{-2}$
Все прочие районы	$7,3 \times 10^{-4}$	$2,35 \times 10^{-2}$

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

$$N(h) = N_s \exp(-h / h_0), \quad (19)$$

где N_s – среднее значение рефракции у поверхности Земли (см. Рекомендацию МСЭ-R P.453), а h_0 определяется как:

$$h_0 = 10^6 \frac{\Delta L_V}{N_s} \quad (20)$$

Тогда k вычисляется с помощью следующего выражения:

$$k = 1 - \left[\frac{n_s r_s}{n(h_0) r(h_0)} \right]^2, \quad (21)$$

где n_s и $n(h_0)$ – значения индекса рефракции вблизи поверхности Земли и на высоте h_0 (определяемые из уравнения (20)), соответственно, а r_s и $r(h_0)$ – соответствующие расстояния до центра Земли.

Для трасс Земля–спутник с углом места θ более 10° увеличение длины трассы в тропосфере (м) можно представить в виде суммы "сухой" и "влажной" составляющих:

$$\Delta L = \Delta L_{dry} + \Delta L_{wet} = 10^{-6} \frac{R_d}{g_m} \left\{ k_1 \cdot p_s + \frac{k_2}{(\lambda + 1)} \cdot \frac{e_s}{T_{ms}} \right\} \cdot \frac{1}{\sin \theta} \quad \text{м}, \quad (22)$$

где:

- p_s, e_s : общее давление воздуха и давление водяного пара у поверхности Земли (гПа);
- T_{ms} : средняя температура водяного пара над поверхностью (К);
- λ : коэффициент уменьшения давления пара;
- R_d : $R/M_d = 287,0$ (Дж/кг К);
- R : молярная постоянная газа = 8,314 (Дж/мол К);
- M_d : молярная масса сухого воздуха = 28,9644 (г/мол);
- $k_1 = 77,604$ (К/гПа);
- $k_2 = 377600$ (К²/гПа);
- $g_m = g(lat, h_s) = 9,784 \cdot (1 - 0,00266 \cdot \cos(2 \cdot lat) - 0,00028 \cdot h_s) =$ ускорение силы тяжести (м/с²);
- lat : широта местоположения (град.);
- h_s : высота местоположения над уровнем моря (км).

Для приемников, расположенных на высоте над средним уровнем моря, h (км), отличным от высоты поверхности, h_s , значения входных метеорологических параметров могут быть экстраполированы из значений поверхности, T_{ms} , e_s и p_s , используя следующие уравнения:

$$\Delta L(h) = \Delta L_{dry}(h) + \Delta L_{wet}(h) = 10^{-6} \frac{R_d}{g_m(h)} \left\{ k_1 \cdot p(h) + \frac{k_2}{(\lambda + 1)} \cdot \frac{e(h)}{T_m(h)} \right\} \cdot \frac{1}{\sin \theta} \quad \text{м} \quad (23a)$$

$$T_m(h) = T_{ms} - \alpha_m \cdot (h - h_s) \quad \text{К} \quad (23b)$$

$$p(h) = p_s \left[1 - \frac{\alpha(h - h_s)}{T_s} \right]^{\frac{g_m}{R_d \alpha}} \quad \text{гПа} \quad (23c)$$

$$e(h) = e_s \cdot \left[\frac{p(h)}{p_s} \right]^{\lambda+1} \quad \text{гПа}, \quad (23d)$$

где:

α_m = вертикальный градиент средней температуры водяного пара (К/км).

$$\alpha \equiv 0,5 \frac{(\lambda+1)g_m}{R'_d} \left[1 - \sqrt{\frac{(\lambda+1)g_m}{R'_d} \left[\frac{(\lambda+1)g_m}{R'_d} - 4\alpha_m \right]} \right] = \text{вертикальный градиент температуры воздуха} \quad \text{К/км} \quad (23e)$$

$$R'_d = R_d / 1000 = 0,287 \quad \text{Дж/г К} \quad (23f)$$

$$T_s = \frac{T_{ms}}{1 - \frac{\alpha R'_d}{(\lambda+1)g_m}} \quad \text{К} \quad (23g)$$

Входные данные для модели могут быть получены при предположении, что метеорологические параметры характеризуются сезонной флуктуацией.

$$X_i(D_y) = a1_i - a2_i \cos \left[2\pi \frac{(D_y - a3_i)}{365,25} \right], \quad (24)$$

где:

- X_i : $p_s, e_s, T_{ms}, \lambda$ или α_m ;
- $a1_i$: среднее значение параметра;
- $a2_i$: сезонная флуктуация параметра;
- $a3_i$: день минимального значения параметра;
- D_y : день года (1 ... 365,25),
1 = 1 января, 32 = 1 февраля, 60,25 = 1 марта.

Коэффициенты $a1$, $a2$ и $a3$ были вычислены путем подгонки гармонической модели к месячной статистике метеорологических параметров, взятой из базы данных ECMWF ERA15.

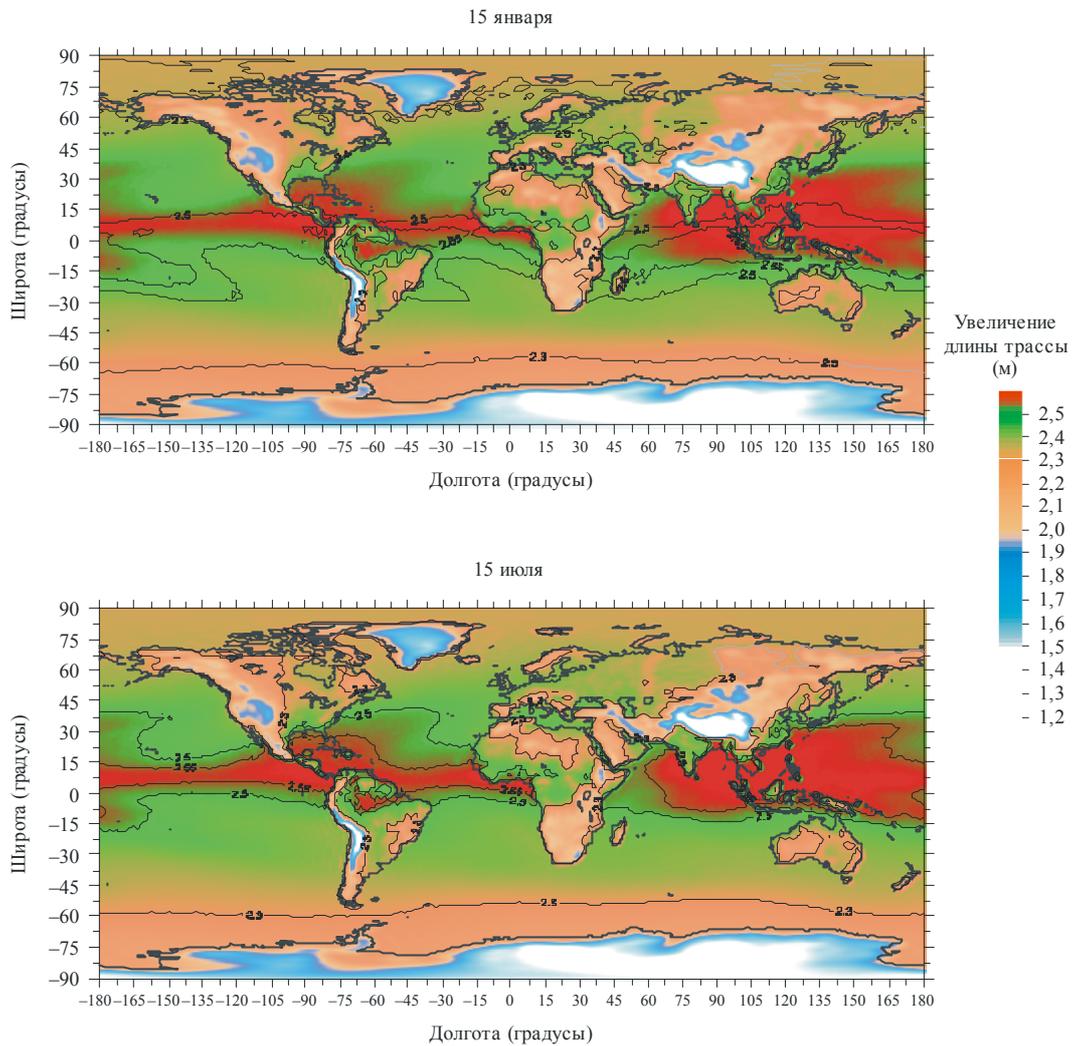
Значения параметров этой гармонической модели, $a1$, $a2$, $a3$ для каждого метеорологического параметра, содержатся в цифровых картах, общим числом 15 карт, с разрешением $1,5 \times 1,5$ (град.). Коэффициенты гармонической модели содержатся в файлах под названием **<met_param>_<mod_par>.dat**. При этом **<met_param>** представляет собой **press**, **vapr**, **tmpm**, **lamd** или **alfm** для p_s , e_s , T_{ms} , λ или α_m , соответственно, а **<mod_par>** – это **a1**, **a2** или **a3**. Данные представлены в диапазоне от 0 до 360 по долготе и от +90 до -90 по широте, с разрешением $1,5^\circ$ как по широте, так и по долготе. Дополнительно необходимые данные с помощью модели следующие: **lat.dat** = эталонные значения широты (90 ... -90), **long.dat** = эталонные значения долготы (0 ... 360), **hreflev.dat** = средняя высота опорного уровня по отношению к уровню моря (м).

Для приемника, расположенного в месте, отличном от точек сетки, увеличение длины трассы должно вычисляться путем выполнения билинейной интерполяции увеличения длины трассы в четырех ближайших точках сетки, причем расчеты производятся с использованием одной и той же высоты приемника.

Точность предлагаемой модели была проверена с использованием радиозонда и измерений в рамках системы GPS, и полученные результаты оказались в пределах 2 и 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.

РИСУНОК 2

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



Примечание 1. – Процедуры Матлаба, которые реализуют модель, описанную уравнениями (22)–(24) набора данных, доступных в разделе Web-сайта МСЭR, относящегося к 3-й Исследовательской комиссии по радиосвязи.

0834-02

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 α (рад), при котором лучи могут быть захвачены в волновод, определяется выражением:

$$\alpha = \sqrt{2 \times 10^{-6} \left| \frac{dM}{dh} \right| \Delta h}, \quad (25)$$

где dM/dh – вертикальный градиент модифицированной рефракции $\left(\frac{dM}{dh} < 0 \right)$, а Δh – толщина волновода, которая представляет собой высоту его верхней границы над передающей антенной.

На рисунке 3 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

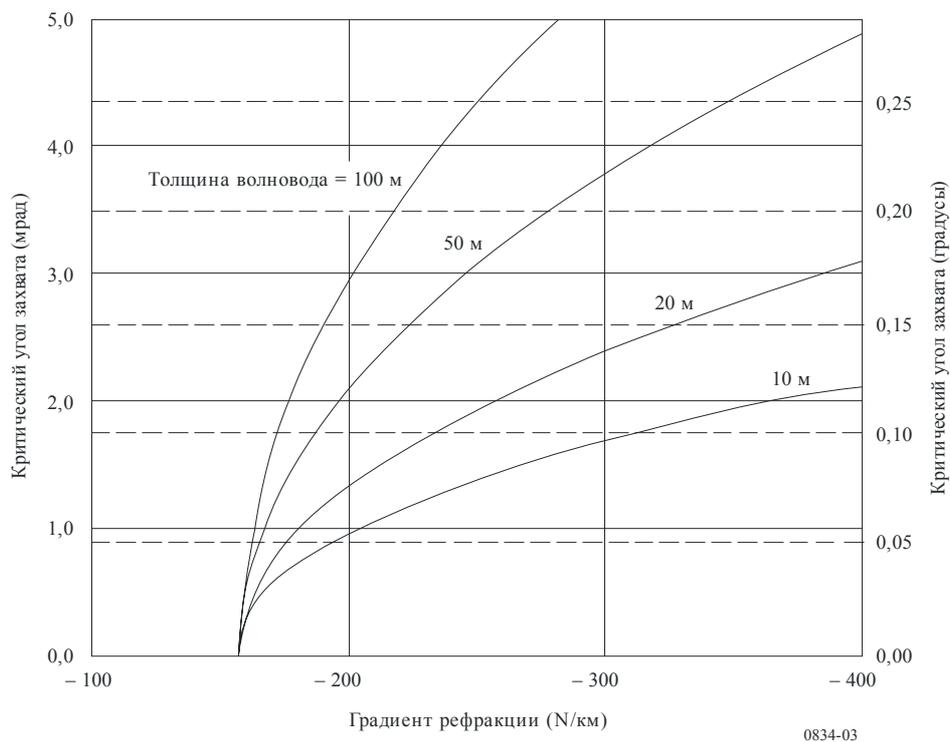
Существование волновода, даже наиболее благоприятным образом расположенного, не обязательно означает, что электромагнитная энергия сигнала будет сосредоточена внутри него, обеспечивая таким образом распространение на большие расстояния. Помимо того, что должно выполняться условие максимального угла места, 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 4 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, f_{min} , 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 4 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 3

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 4

**Минимальная частота захвата сигнала в атмосферные радиоволны
с постоянными градиентами рефракции**

