

ВЛИЯНИЕ РЕФРАКЦИИ НА ПОГЛОЩЕНИЕ И КРИВИЗНУ ТРАЕКТОРИИ ЛУЧА КОРОТКИХ МИЛЛИМЕТРОВЫХ И СУБМИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛН В ЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЕ

*Р.П.Быстров, А.В.Соколов, С.А.Соколов
ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН*

В статье изучена рефракция и поглощение коротких миллиметровых и субмиллиметровых радиоволн в земной атмосфере. Оценена теоретически зависимость от зенитного угла кривизны луча и поглощения в миллиметровом и субмиллиметровом диапазоне на волнах 8,2, 3,2, 1,95, 1,4, 0,96, 0,88, 0,73 мм

Summary

The refraction and attenuation of short MM and SBMM radio waves in earth's atmosphere have been studied. The dependence of attenuation and ray curvature from zenith angle are estimated digitally at wavelengths 8,2, 3,2, 1,95, 1,4, 0,96, 0,88 and 0,73 mm.

Введение

Миллиметровый диапазон получил во всем мире практическое применение на волнах 8-3,3 мм в радиолокации и частично в связи. Однако, в короткой части миллиметрового и длинноволновой части субмиллиметрового диапазонов еще находятся в стадии лабораторных исследований. В последнее время повышен интерес к терагерцовому диапазону волн (10^{11} - 10^{13} Гц) для задач радикального повышения разрешения и создания устройств получения радио изображений, хотя до сих пор слабо освоены волны в короткой части миллиметрового и длинноволновой части субмиллиметрового диапазона

Проблема “тесноты” в эфире может быть решена по мере перехода только на более высокие частоты излучения, поскольку на миллиметровых, и особенно, субмиллиметровых радиоволнах возникает возможность передачи практически неограниченных объемов информации. Однако, уже имеющиеся результаты исследований позволяют сделать заключение, что длинноволновая часть СБММ диапазона волн может найти использование при создании радиотехнических систем обнаружения и наведения, а также в системах связи на небольшие расстояния (в зависимости от длины волны ориентировочно в пределах до 2-2,5 км).

Достоинством устройств данного диапазона волн при их реализации является обеспечение высокой разрешающей способности радиолокационных систем при обнаружении и сопровождении объектов. В системах связи обеспечивается высокая информативность радиосигналов.

Известно, что основной, не решенной до сих пор в радиолокации остается проблема эффективного распознавания обнаруживаемых объектов. Однако, с изменением характера совершенствования средств и методов маскировки требуется повышение эффективности РЛС, особенно в условиях плохой видимости, в ночных условиях, при выпадении осадков и при наличии пыледымовых помех. Требуется также повышение точности определения координат объектов и снижение массогабаритных размеров радиолокационной аппаратуры и др.

Опыт показывает, что лучшим выходом для повышения разрешающей способности по угловым координатам, помехоустойчивости и скрытности РЛС целесообразно переходить к использованию коротковолновой части миллиметрового диапазона радиоволн.

В настоящее время исследуются зарубежные РЛС в ММ и СБММ диапазонах волн, находящихся в стадии разработок, большая часть которых относится к обширному классу РЛС обнаружения, распознавания, определения координат, а также наведения оружия.

1 Ослабление миллиметровых и субмиллиметровых радиоволн и рефракция в конвективной тропосфере.

Проведем анализ особенностей распространения короткой части и длинноволновой части субмиллиметровых радиоволн. Как известно, Б.А.Введенский и М.И.Пономарев впервые методом геометрической оптики исследовали атмосферную рефракцию радиоволн в конвективном состоянии атмосферы [1]. В настоящее время представляет большой интерес исследование влияние рефракции на ослабление в короткой ММ и в длинноволновой частях диапазона СБММ волн. При распространении этих излучений ослабление в водяном паре невелико, а в кислороде практически отсутствует.

При распространении излучений сквозь толщу атмосферы траектория волны вследствие нормальной рефракции искривляется по направлению к земной поверхности, при этом степень этой кривизны определяется зависимостью показателя преломления воздуха n от высоты; в окнах прозрачности рефракция зависит от высотных характеристик температуры, давления и влажности воздуха. Это приводит к тому, что ослабление на ММ и СБММ волнах из-за паров воды и кислорода оказывается сложной функцией высоты над земной поверхностью. На коротких ММ и СБММ волнах ослабление уменьшает дальность действия только из-за поглощения паров воды. Ослабление в водяном паре исследовано во всем диапазоне частот, при этом введены поправки в теорию ослабления, что позволило привести в согласие с данными экспериментальных исследований [2].

В ряде случаев приближенно вводится метод эффективных высот для оценки поглощения ММВ и СБМВ при их вертикальном распространении [3-4]. Для наклонного распространения рефракция учитывалась путем введения эквивалентного радиуса Земли. Подобный метод учета рефракции во всей толще атмосферы является весьма приближенным, поскольку концепция эквивалентного радиуса Земли справедлива только для лучей, достаточно прижатых к Земле. Данная концепция применима только к тонким слоям воздуха, для которых справедлив линейный закон убывания показателя преломления воздуха с высотой. Между тем, результаты обработки данных аэростатного и рефрактометрического зондирования с определенностью указывают на то, что показатель преломления воздуха является нелинейной функцией высоты в тропосфере

2. Решение уравнения траектории луча в поглощающей среде.

Для определения искривления лучей с учетом поглощения на ММ и длинноволновой части СБММ волнах в тропосфере можно применить численные методы к решению уравнения эйконала.

Пусть в декартовой системе координат излучение в атмосфере из точки А (x_0, y_0) распространяется в неоднородной атмосфере до точки В (x, y) (см. рис. 1). Разобьем толщу атмосферы на достаточно большое число p концентрических с земной поверхностью слоев так, чтобы в пределах каждого i -того слоя траектория луча была прямой линией, а показатель преломления был бы постоянным.

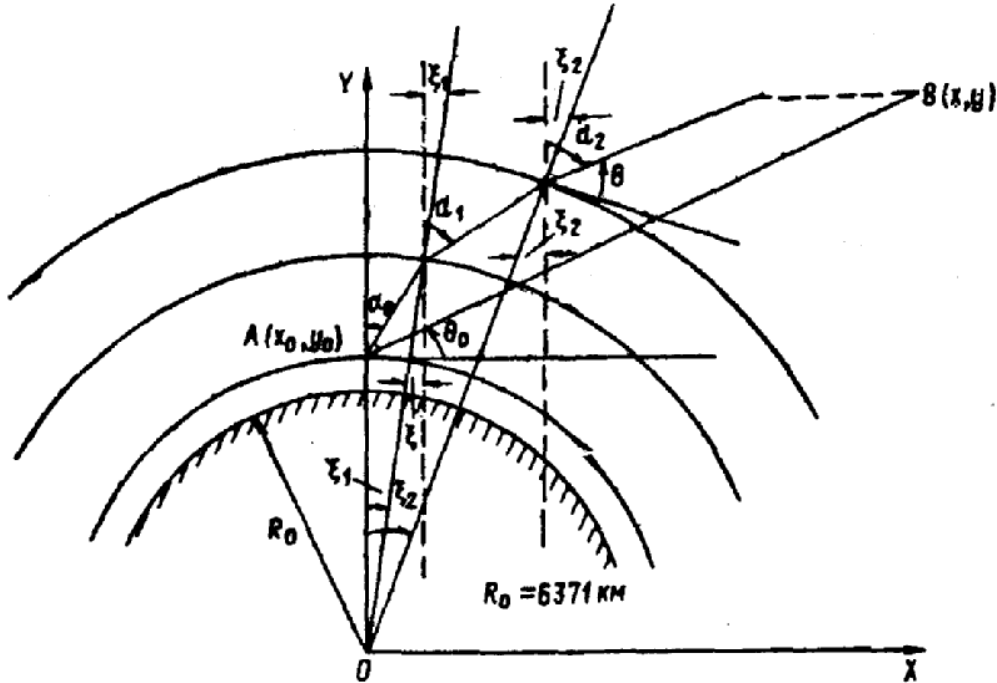


Рис.1. К оценке влияния рефракции на ослабление ММ и СБММ радиоволн.

Тогда можно записать уравнение траектории луча для слоя k в виде::

$$\frac{\sin[a_{k-1}(x, y) - \xi_k(x, y)]}{\sin[a_k(x, y) - \xi_k(x, y)]} = \frac{n_k}{n_{k-1}}; \quad (1)$$

$$\xi = \arcsin \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}};$$

$$h = \sqrt{x^2 + y^2} - 6371,$$

$$x_0 = 0; y_0 = 6371 + h,$$

где угол $a(x_0, y_0) = a_0; k = 1, 2, \dots; h$ - высота над земной поверхностью; a_k - угол между k -той касательной к траектории и осью y ; ξ - центральный угол АОВ; x_0, y_0, a_0 - начальные значения распространяющего луча,

Величина показателя преломления может быть рассчитана по известной формуле

$$(n-1)^6 = \frac{77,6}{T(h)} \left[P(h) + \frac{4810e(h)}{T(h)} \right], \quad (2)$$

где $P(h)$ - значение давления воздуха в миллибарах (м.бар.); $T(h)$ - температура воздуха в градусах Кельвина; e - влажность в м.бар.

Значения $P(h)$, $T(h)$ и $e(h)$ в слое 0..25 км принимались в соответствии с усредненными за 30 лет данными по стандартной модели США для 60° с. ш. Анализ усредненных профилей $P(h)$, $T(h)$ и $e(h)$ показывает, что эти данные близки к результатам измерений давления и температуры в тропосфере по данным ГГО.

Эффективные длины траекторий лучей между точками А и В могут быть найдены с учетом и без учета рефракции на основе выражений:

$$L'_{эфф} = \frac{1}{\gamma_0} \int_{AB} Y(y) ds, \quad (3)$$

$$L_{эфф} = \frac{1}{\gamma_0} \int_{AB} Y(y) ds,$$

где γ_0 - коэффициент поглощения в парах воды при нормальных атмосферных условиях; $\gamma(y) \approx \frac{P(y)e(y)}{T(y)^m}$; m - константа, зависящая от длины волны; $L'_{эфф}$ и $L_{эфф}$ – длины лучей с рефракцией и без рефракции [2]/

Тогда величины ослабления Γ вдоль искривленной траектории луча (дуга АВ) и вдоль прямой АВ могут быть найдены следующим образом:

$$\Gamma_{\text{дуга АВ}} = \gamma_0 L'_{эфф}, \quad (4)$$

$$\Gamma_{\text{АВ}} = \gamma_0 L_{эфф}. \quad (5)$$

Результаты исследований показывают, что значения $L'_{эфф}$ претерпевают значительные изменения в зависимости от угла места F_0 , а также высоты над земной поверхностью и времени сезона. Расчет траекторий лучей в толще атмосферы на ММ и СБММ волнах был проведен в с шагом 0,1 км.

На рис 2 и 3 построены зависимости эффективные длины траекторий $L'_{эфф}$ в км от высоты h км с учетом рефракции по стандартной модели США для зимы и лета, в

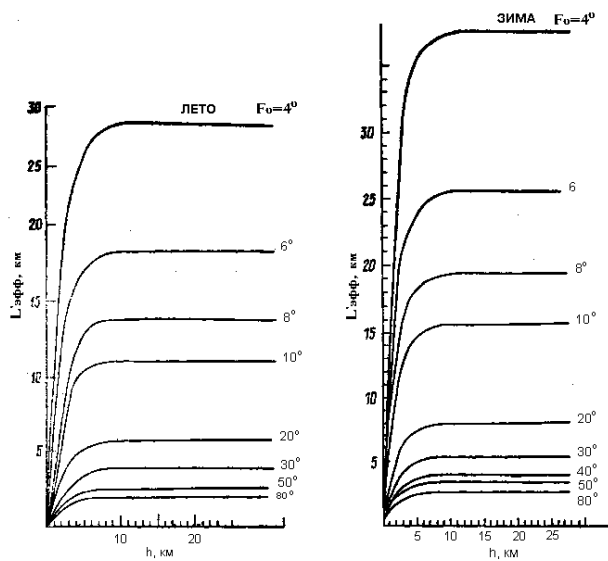


Рис 2 и 3. Зависимости $L'_{эфф}$ от F_0 для зимы и лета, рассчитанные для указанной выше модели тропосферы с учетом рефракции

качестве параметров для зимы и лета были приняты углы возвышения лучей в пределах от 4 до 90°. Приведенные данные соответствуют нормальным условиям: $P=760$ мм рт. ст., $T = 300$ К и $e = 12$ мб для лета и $P = 762$ мм рт. ст.; $T = 253$ К и $e = 1,43$ м.бар для зимы.

Величины поглощения в этом случае при вертикальном распространении в толще атмосферы можно получить на основе формулы:

$$\Gamma(h) = \Gamma_0^{O_2} e^{-h/H_1} + e^{-h/H_2}, \quad (6)$$

где $\Gamma_0^{O_2}$ и $\Gamma_0^{H_2O}$ - поглощение в парах воды и кислороде у земной поверхности, H_1 и H_2 - характеристические или эффективные высоты (под эффективной высотой понимается толщина идеализированной однородной атмосферы, для которой поглощение при распространении излучения во всей ее толще такое же, как и в неоднородной атмосфере).

Выражение (6) применимо во всем диапазоне миллиметровых и субмиллиметровых радиоволн, за исключением центров линий поглощения (например, на волнах 1,35 см и 5; 2,53; 1,65 мм). В работе [3] на основе радиозондовых измерений высотных профилей метеорологических элементов в тропосфере было установлено, что эффективная высота оказалось равной $H_{эфф} = 1,8 \pm 0,3$ км.

В настоящее время установлено, что эффективные высоты составляют $H_{эфф O_2} = 5$ км и $H_{эфф H_2O} = 2,1$ км. [4,5]. Ранее была определена средне- годовая эффективная высота для той же модели тропосферы $H_{эфф} = 1,5$ км в средней полосе европейской территории России по С.А.Жевакину и А.Г.Кислякову [4,5].

Для экспоненциальной модели атмосферы США результат расчета в соответствии с выражениями (4) и (5) совпал с данными зондовых измерений для лета $H_{эфф} = 1,78$ км., для зимы $H_{эфф} = 2,5$ км. Интересно отметить, что угловые зависимости по принятой модели тропосферы для зимы и лета различаются: для наклонных лучей для углов места в 4° , при

этом высота однородной тропосферы летом оказывается ниже, чем зимой. (см Рис.2 и 3)
 На Рис 2 и 3 показаны соответствующие зависимости $L'_{эфф}$ от F_0 для зимы и лета, рассчитанной для указанной выше модели тропосферы с учетом рефракции.

3.Зависимость поглощения с учетом рефракции в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах волн от зенитного угла

Зная $L'_{эфф}$, можно определить и исследовать зависимость ослабления в окнах прозрачности в миллиметровом, субмиллиметровом диапазоне, от зенитного угла и условий нормальной и повышенной рефракции.

Подобные зависимости для летних и зимних условий показаны на рис. 4 и 5, где по оси ординат отложены значения ослабления Γ с учетом рефракции по дуге АВ, а по оси абсцисс—величины зенитных углов α_0 ; в качестве параметров на рис. 4 и 5 даны длины волн, на которых рассчитаны ослабление радиоволн. Приведенные данные также соответствуют нормальным условиям: $P=760$ мм рт. ст., $T = 300$ К и $e = 12$ мб для лета и $P = 762$ мм рт. ст.; $T = 253$ К и $e = 1,43$ м.бар для зимы в соответствии с методикой по А.Ю Зражевскому [2].

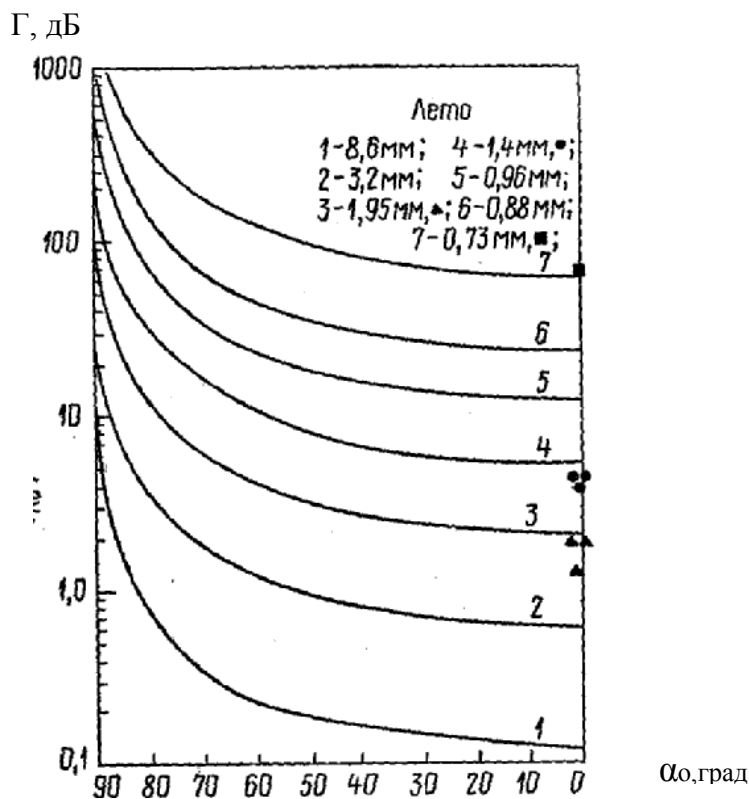


Рис. 4. Зависимость ослабления ММ и СБММ волн от зенитного угла α_0 (лето) с учетом рефракции

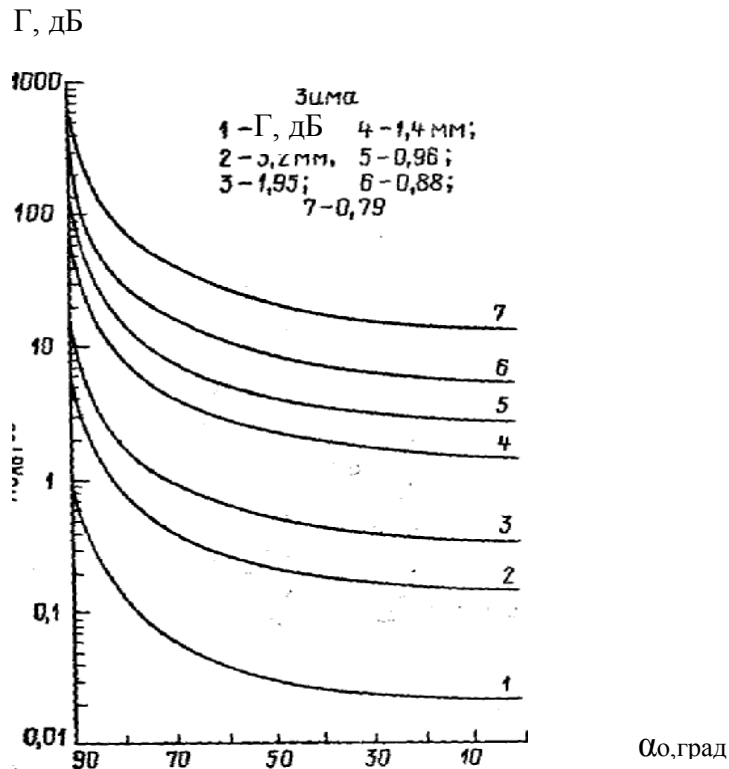


Рис 5. Зависимость ослабления ММ и СБММ от зенитного угла α_0 (зима) с учетом рефракции

На рис. 6 показана зависимость отношения $\Delta L/L_{эфф}$ в % от общей длины луча для зимних и летних условий, отсюда видно, что влияние рефракции летом оказывается более сильным, чем зимой, причем отношение в случае принятой модели составило летом 36% и зимой 20%.

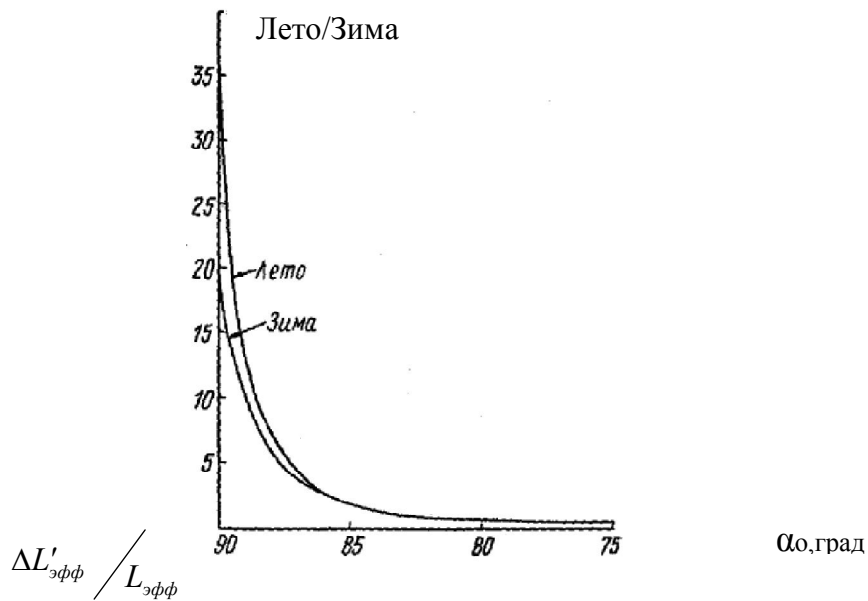


Рис .6. Зависимость отношения $\Delta L/L_{эфф}$ в % от общей длины луча для зимних и летних условий

В случае модели тропосферы, принятой на основе данных зондирования, усредненных за 30 лет, влияние рефракции оказывается еще более значительным. Существенно то, что в условиях нормальной и повышенной рефракции величина $\Delta L'_{эфф} = L'_{эфф} - L_{эфф}$ имеет положительный знак. Это и означает, что эффект рефракции приводит к уменьшению ослабления Γ вдоль траектории луча в толще земной атмосферы.

Хотя экспериментальная проверка теоретических результатов представляет в свободной атмосфере нелегкую задачу, сравнение результатов с опытом (см. точки на рис.4) показывает, что расчетные зависимости ослабления от a_0 , тем не менее определяет порядок значений полного ослабления в чистой атмосфере.

Результаты оценочного расчета сравнивались также с экспериментом на некоторых длинах волн в толще атмосферы, которые выполнены в высотной обсерватории Мауна-Кеа [6] в январе - феврале 1976 г. и приведены в табл. 1.

Сравнение расчетов ослабления в атмосфере с экспериментом на высотной обсерватории (Мауна Кеа, Гавайские острова) в январе-феврале 1976 г, зенитный угол $a_0 = 55^\circ$, $h_0 = 4,2$ км.[6]

Таблица 1

<i>Длина волны, мм</i>	<i>Расчет, дБ</i>	<i>Измерения, дБ</i>
2	0,5	0,5
1,33	1,5	1,5
1,0	1,8	2,5
0,44	5,5	9,2

Для выбранной модели атмосферы соотношения (1) в нормальных условиях и позволяют находить полное искривление траектории a_0 луча, проходящего через всю толщу атмосферы. Ограничиваясь высотой порядка 25 км, можно определить значение a_0 , например, для летних условий. Результаты такого расчета даны на рис. 5 откуда следует, что полное искривление луча вследствие рефракции в тропосфере составляет 48".

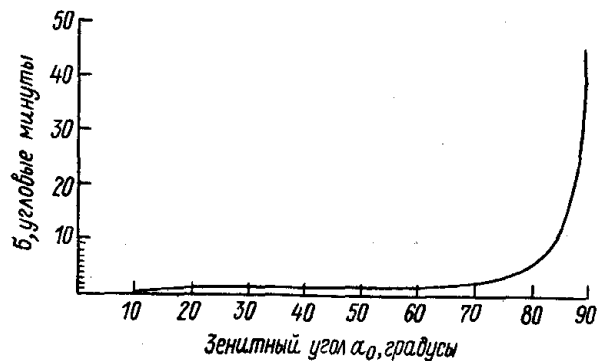


Рис. 7. Зависимость общего искривления траектории луча с учетом рефракции от зенитного угла a_0

Таким образом, методы геометрической оптики по модели атмосферы дают возможность учитывать в среднем влияние рефракции на величины ослабления при углах $\alpha_0 > 70^\circ$.

Повышенная и критическая рефракция приводит к существенному уменьшению этого ослабления, если в качестве модели усредненные за длительные сроки данные о высотных характеристиках давления, температуры и влажности.

По измерениям эффективной высоты по данным радиозондовых, как уже указывалось, в России установлено, что высотный профиль поглощения в водяном паре составляет величину $H_{эфф} = 1,8 \pm 0,3$ км. Поэтому при распространении СБММ волн на высотах больших 3-5 км ослабления уменьшается в 10 раз и можно ожидать увеличения дальности действия по сравнению с дальностью действия у земной поверхности.

Из результатов расчетов следует, что на коротких миллиметровых длинах волн при нормальных условиях в диапазоне 5- 2 мм, 1,42...1 мм при подъеме на высоты 4,5 км над уровнем моря вертикальное поглощение убывает в дБ в 10 раз [7]. Известны результаты измерений на волне 1,3 мм при нормальных условиях, откуда следует, что средняя величина полного вертикального поглощения составляет 1,5 дБ [3].

Таким образом, теоретически рассчитано ослабление в сферически-слоистой стандартной атмосфере с учетом рефракции в парах воды на волнах 8...0,73 мм при углах места менее 20 градусов, а также численными методами оценена: зависимость ослабления в парах воды от зенитных углов. Определены количественные высотные зависимости ослабления в парах воды в стандартной атмосфере с учетом рефракции от зенитных углов на длинах волн 8,6 мм; 3,3 мм; 1,95 мм; 1,4 мм; 0,96 мм; 0,88 мм и 0,73 мм для зимней и летней тропосферы.

Установлено, что ослабления в водяном паре уменьшается, поскольку излучение распространяется в более высоких слоях тропосферы из-за влияния рефракции. Уменьшение ослабления тем больше, чем больше величина подъема от земной поверхности. Измерения обнаружили в обсерватории Мауна-Кеа на Гавайских островах зимой на высоте 4,2 км значительное уменьшение ослабления (до 1,5 дБ\км в летнее время года)

В зимней тропосфере в диапазоне миллиметровых и субмиллиметровых радиоволн ослабление на всех без исключения высотах с учетом рефракции существенно меньше чем в летней. При больших зенитных углах более 80° на СБММ волнах тропосфера становится непрозрачной для передачи сигналов.

Влияние рефракции при зенитных углах больших 85° интенсивнее летом, чем зимой, поскольку удлинение длины траекторий лучей составило 36% летом, чем 20% зимой.

Установлено, что полное искривление горизонтальных лучей в стандартной атмосфере составляет 48 угловых секунд при нормальной рефракции.

Литература

1. Введенский, М.И. Пономарев. Изв. АН СССР», ОТН, 1946, № 9. – с. 1201
2. А.Ю. Зражевский Радиотехника и электроника,..1976,21,953.
3. Кузовлев В.В., Станкевич К.С.» 1954,7,175. Изв. Высш. Учебных заведений, радиофизика,
4. С.А. Жевакин, А.П. Наумов Изв. Высш. Учебных заведений, радиофизика, 1966,9,433.
5. Кисляков А.Г. Изв. Высш. Учебных заведений, радиофизика, 1966,9,451.
6. Moffat P.H, Gebbie H.A. and other. // Preprint of Appleton Laboratory, UK, 1974
7. Зражевский А.Ю., Исхаков Э.А. Радиотехника и электроника , 1978,23. стр 1339