

УДК 537.877

Ф.Н. Захаров, М.В. Крутиков, Ю.П. Акулиничев

Оценка величины множителя ослабления радиоволны при наличии приподнятого тропосферного слоя

Предложен алгоритм расчета дистанционной зависимости множителя ослабления при наличии в тропосфере приподнятого слоя с повышенным значением вертикального градиента показателя преломления. С помощью численного моделирования уточнено выражение для коэффициента отражения радиоволны от такого слоя. Проведено сравнение результатов расчета множителя ослабления на морской трассе, полученных с использованием предложенного метода и метода численного решения параболического уравнения, а также оценена точность расчётов.

Ключевые слова: распространение радиоволн, множитель ослабления, слой атмосферы повышенной рефракцией, коэффициент отражения.

Слоистое строение тропосферы оказывает значительное влияние на величину принятого сигнала. Помимо волноводов испарения и приповерхностных волноводов заметное значение имеют приподнятые слои с повышенной рефракцией. Такие слои, называемые также инверсными, образуются на высотах до нескольких километров и в некоторых случаях образуют волноводную структуру. Они могут выполнять как роль направляющего канала распространения радиоволны волноводного типа со сравнительно малым затуханием внутри, так и роль отражательных и экранирующих поверхностей, что зависит от взаимного расположения источника радиоизлучения (ИРИ) и приемного устройства (ПрУ) относительно слоя.

Приподнятые волноводы способны обеспечить распространение радиоволн с частотами выше 100 МГц на расстояния, намного превосходящие пределы радиогоризонта, и являются весьма вероятной, но и наименее изученной причиной аномально высоких уровней сигналов за горизонтом [1, 2].

Общая характеристика приподнятых волноводов дается в рекомендации [3], в которой определяются их основные параметры: вероятность существования E_p (%), интенсивность E_s (М-единицы), высота нижней границы волновода E_b (м), высота максимума M -кривой в волноводе E_m (м) и толщина волновода E_t (м), где M – модифицированный индекс преломления $M(h)=N(h)+0,157h$, М-ед., $N(h)$ – высотный профиль индекса преломления. Средние параметры слоев повышенной рефракции для Тихого океана можно найти в [4], а для отдельных морских районов – в [5–8], кроме того, в настоящее время подготавливается радиоклиматический тропосферный атлас Атлантического океана [9]. На рис. 1 представлена трёхлинейная аппроксимация вертикального M -профиля тропосферы при наличии приподнятого волновода [3].

Анализ литературы показал, что, несмотря на несколько предпринимавшихся попыток (например, [1, 10–14] и др.), на данный момент отсутствует простая и достаточно надежная методика расчета уровня сигнала при наличии отражений от приподнятого слоя повышенной рефракции. Исключение составляет работа [15], в которой приведена методика оценки дистанционной зависимости множителя ослабления, но и там нет сравнения получаемых результатов с тем, что дает эксперимент или другие численные методы расчета. Кроме того, в этой работе не учитывается волна, распространяющаяся вдоль поверхности Земли, а из параметров инверсионных слоев используются только их интенсивность и высота над поверхностью Земли и никак не учитывается толщина слоя.

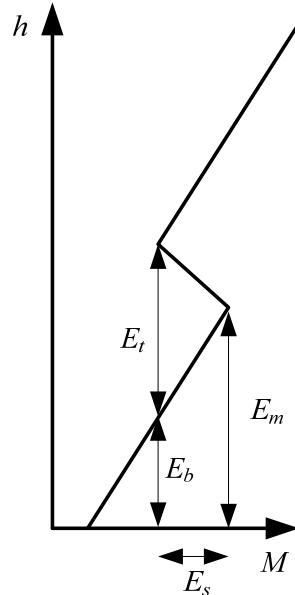


Рис. 1. Высотный профиль модифицированного индекса преломления

Таким образом, целью работы является уточнение существующей методики расчёта множителя ослабления при наличии в тропосфере приподнятого инверсного слоя путем сравнения с результатами, получаемыми при численном решении волнового параболического уравнения. Для численного решения применяется метод смешанного дискретного преобразования Фурье в комбинации с методом разделения переменных [16–19]. Считается, что такой метод является эталонным и позволяет максимально точно смоделировать распространение радиоволн, соответствующее реальным условиям [20].

Описание метода. В рекомендации [3] приподнятый волновод представлен в виде слоистого образования, значительного по геометрическим размерам. Коэффициент отражения радиоволны от такого слоя можно вычислить по формуле [1, 11, 15]

$$R = \frac{\Delta\epsilon}{4\sin^2\psi}, \quad (1)$$

где $\Delta\epsilon = 2E_s 10^{-6}$ – перепад диэлектрической проницаемости в слое повышенной рефракции; ψ – угол скольжения радиоволны при падении на нижнюю поверхность слоя. Формула (1) справедлива в случае, когда отражающий слой находится в зоне прямой видимости передающей и приемной антенн, а ширина диаграммы направленности антенны больше 1° [15].

Угол ψ можно легко вычислить исходя из геометрии задачи (рис. 2) в предположении, что точка отражения от слоя находится на середине трассы распространения радиоволны (РРВ). Данный угол зависит от расстояния между ИРИ и ПрУ, а также от высоты слоя над Землёй, и определяется по формуле

$$\psi(D) = \arctg \left[\frac{E_m + a_3 \left(1 - \cos \left(\frac{D}{2a_3} \right) \right)}{a_3 \sin \left(\frac{D}{2a_3} \right)} \right], \quad (2)$$

где D – расстояние вдоль Земли между ИРИ и ПрУ; a_3 – эквивалентный радиус Земли. Эквивалентный радиус Земли введен для учёта рефракции радиоволны в тропосфере.

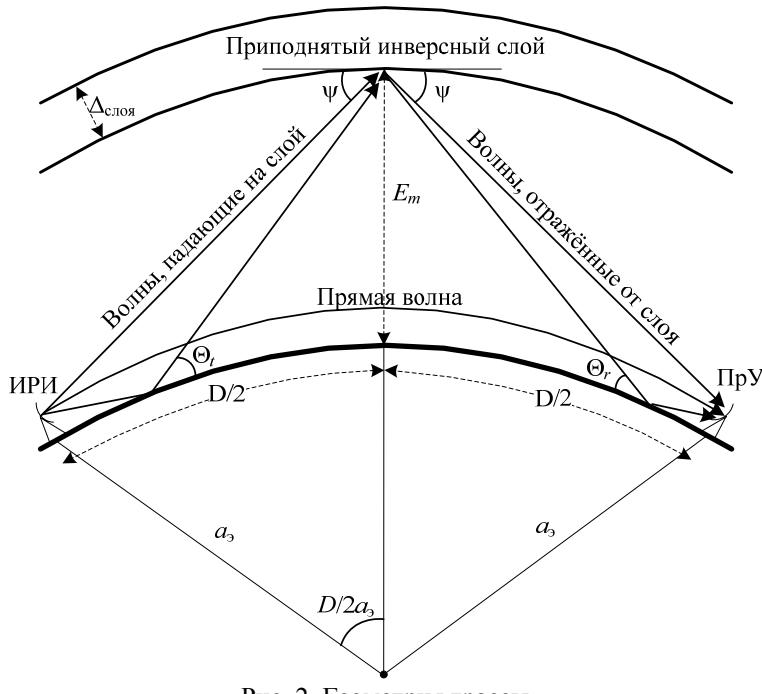


Рис. 2. Геометрия трассы

В качестве промежуточного этапа необходимо оценить ослабление сигнала на участках ИРИ-слой и слой-ПрУ. При этом предполагается, что слои, для которых точка отражения лежит вне прямой видимости корреспондирующих пунктов, не влияют на уровень сигнала за горизонтом, поскольку волна, отраженная от этих слоев, испытывает двойное дифракционное ослабление земной поверхностью [11].

Ясно, что необходимо учесть положение и форму диаграмм направленности антенн ИРИ и ПрУ, а также их лепесткование за счет отражения от подстилающей поверхности [21]. Используется гауссовская аппроксимация главного лепестка диаграммы направленности

$$F_{ДНА}(\theta_0 - \theta) = \exp \left\{ -0,8 \left(\frac{\theta - \theta_0}{\theta_{0,5}} \right)^2 \right\}. \quad (3)$$

где $\theta_{0,5}$ – ширина диаграммы направленности антенны в вертикальной плоскости по уровню половинной мощности; $\theta = \psi - D/2a_3$ – текущее значение угла места точки отражения.

На каждом из упомянутых участков эффект лепесткования диаграммы направленности соответствующей антенны за счет отражений от моря описывается известной интерференционной формулой для множителя ослабления

$$V_{t,r} = \sqrt{1 + \eta_{t,r}^2 \cdot r_{t,r}^2 \cdot |\rho_{t,r}|^2 + 2\eta_{t,r} \cdot r_{t,r} \cdot |\rho_{t,r}| \cdot \cos(\Delta\phi + \beta_{t,r})}, \quad (4)$$

где $\eta_{t,r} = \left[1 + \frac{D^2 h_{t,r}' E_m'}{2a_3(h_{t,r}' + E_m')^3} \right]^{-1/2}$ – коэффициент расходимости, учитывающий уменьшение модуля

коэффициента отражения от сферической поверхности Земли [21]; $h_t' = h_t (1 - \xi_t^2)$, $h_r' = h_r (1 - \xi_r^2)$ и $E_m' = 1,2 E_m (1 - \xi_{t,r}^2)$ – приведенные высоты антенны ИРИ, антенны ПрУ и отражающего слоя соответственно [11]; $\xi_{t,r} = \frac{D}{\sqrt{8a_3} (\sqrt{h_{t,r}'} + \sqrt{E_m'})}$; h_t , h_r и E_m – фактические высоты антенны ИРИ, антенны ПрУ и приподнятого слоя повышенной рефракции соответственно,

$$\rho_{t,r} = \begin{cases} \frac{\sin \Theta_{t,r} - \sqrt{\varepsilon - \cos^2 \Theta_{t,r}}}{\sin \Theta_{t,r} + \sqrt{\varepsilon - \cos^2 \Theta_{t,r}}} & - \text{ГП}, \\ \frac{\varepsilon \sin \Theta_{t,r} - \sqrt{\varepsilon - \cos^2 \Theta_{t,r}}}{\varepsilon \sin \Theta_{t,r} + \sqrt{\varepsilon - \cos^2 \Theta_{t,r}}} & - \text{ВП}, \end{cases} \quad \text{– коэффициенты отражения от морской поверхности для}$$

горизонтальной (ГП) и вертикальной (ВП) поляризаций радиоволны [14]; $\beta = \arg(\rho_{t,r})$ – фаза коэффициента отражения от поверхности моря; $\varepsilon = 65 + i60\sigma\lambda$ – комплексная диэлектрическая проницаемость морской воды с учётом её проводимости σ [22]; λ – длина радиоволны; $\Theta_t = \arctg \left(2 \frac{h_t' + E_m'}{D} \right)$, $\Theta_r = \arctg \left(2 \frac{h_r' + E_m'}{D} \right)$ – угол скольжения луча в точке отражения от морской

поверхности для участков ИРИ-слой и слой-ПрУ соответственно [11]; $\eta_{t,r} = \exp \left\{ -0,002 \left(\frac{U^2}{\lambda} \sin \Theta_{t,r} \right)^2 \right\}$ –

дополнительный коэффициент ослабления при отражении от морской поверхности за счет ее ветрового волнения [12]; U – скорость ветра на высоте 10 м; $\Delta\phi_{t,r} = k\Delta D_{t,r}$ – разность фаз между

прямым и отраженным от моря сигналами ИРИ; $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число; $\Delta D_{t,r} = \frac{4h_{t,r}' E_m'}{D}$ – разность хода прямого и отраженного от моря сигналов на участках ИРИ-слой (индекс t) и слой-ПрУ (индекс r).

Уровень прямого сигнала, распространяющегося вдоль поверхности Земли, можно легко рассчитать по методике, предложенной В.А. Фоком [23]. В точке приёма сигналы складываются некогерентно, т.е. суммируются мощности сигналов.

Расчёты множителя ослабления по приведённой методике, основанной на коэффициенте отражения (1), и сравнение результатов с тем, что получено численным методом, показали, что при тол-

щине слоя меньше 100 м расчёт по отражательным формулам завышает значение уровня сигнала на несколько децибел, а при увеличении толщины слоя до 400 м завышает на 25–35 дБ. После проведения серии расчётов множителя ослабления для разных отражающих слоев было установлено, что с увеличением толщины слоя и уменьшением длины радиоволны коэффициент отражения от слоя должен уменьшаться. В результате подбора способов введения дополнительных множителей коэффициент отражения R приобрел такой вид:

$$R = \frac{\Delta\epsilon}{4\sin^2\psi} \cdot \frac{\mu\lambda}{\sqrt{\Delta_{\text{слоя}}}}, \quad (5)$$

где $\mu = 5 \text{ м}^{-1/2}$. Толщину слоя повышенной рефракции $\Delta_{\text{слоя}}$ можно вычислить через параметры приподнятого волновода очевидным способом, приведенным в рекомендации [3]:

$$\Delta_{\text{слоя}} = E_t + E_b - E_m. \quad (6)$$

Этапы расчёта множителя ослабления на заданной дальности от ИРИ. Последовательность действий при расчёте множителя ослабления можно описать следующим образом.

1. Расчёт максимальной дальности, на которой возможен приём отражённого сигнала:

$$D_{\max} = \sqrt{8a_3 E_m}. \quad (7)$$

Если текущая дальность D больше максимальной D_{\max} , то считаем, что отражённый от слоя сигнал отсутствует, и данный алгоритм не применяется. В этом случае используется методика расчёта в зоне дальнего тропосферного распространения (ДТР) [10].

2. Расчёт по методике В.А. Фока [23] множителя ослабления V_f на текущей дальности для волны, распространяющейся вдоль поверхности Земли.

3. Расчёт множителя ослабления на двух участках с использованием формул (4).

4. Расчёт коэффициента отражения от слоя повышенной рефракции R по формуле (5).

5. Расчёт множителя ослабления сигнала, отражённого от слоя, с учётом ДН передающей антенны:

$$V_0 = V_t \cdot R \cdot V_r \cdot F_{\text{ДН}}. \quad (8)$$

6. Расчёт общего множителя ослабления (некогерентное сложение сигналов)

$$V[\text{дБ}] = 10 \cdot \log(V_0^2 + V_f^2). \quad (9)$$

Приведённый алгоритм позволяет рассчитать множитель ослабления на одной фиксированной дальности от ИРИ. Для того чтобы построить дистанционную зависимость множителя ослабления, необходимо выполнить расчёты по пунктам 2–6 для всех дальностей из интересующей области с шагом, например, 10 км.

Сравнение результатов расчёта множителя ослабления. На рис. 3–5 представлены результаты расчёта множителя ослабления с использованием приведенной методики и численного решения параболического уравнения. На графиках «а» изображены мгновенные значения множителя ослабления, а на графиках «б» – слаженные значения. Сглаживание проводилось методом скользящего среднего с окном шириной 80 км. В реальных экспериментах невозможно снять мгновенный профиль множителя ослабления. При движении ПрУ вдоль трассы происходит усреднение принимаемого сигнала как по дальности, так и по времени. Таким образом, для сопоставления реальных профилей с расчётными нужно проводить усреднение последних.

Все графики на рис. 3–5 получены при следующих исходных данных: высота приёмной и передающей антенн 15 м, ширина ДН передающей антенны 2 град, поляризация сигнала горизонтальная, эквивалентный радиус Земли 8500 км. Для численного решения параболического уравнения область расчёта ограничена высотой 5 км, максимальный угол в спектре плоских волн равен 8°. Для учёта комплексной диэлектрической проницаемости подстилающей поверхности используется смешанное преобразование Фурье [16, 24]. Для устранения ложных отражений от искусственной верхней границы области расчёта используется искусственный поглощающий слой [25], занимающий 25% ширины области расчёта. Поглощающий слой представляет собой дополнительный множитель, ослабляющий уровень поля на границе области расчёта. Амплитуда множителя изменяется от 1 до 0 по кубическому закону [26].

На дистанционных зависимостях множителя ослабления, полученных по отражательным формулам, наблюдаются глубокие минимумы, которые являются следствием интерференции волн, отражённых от Земли в окрестности точек излучения и приёма (см. рис. 2). При численном решении параболического уравнения такого не наблюдается. Это объясняется тем, что в отражательных фор-

мугах предполагается зеркальное отражение луча от нижней границы инверсного слоя в одной точке, в то время как в реальных условиях, а также при численном решении параболического уравнения отражение происходит от всей толщи слоя. Таким образом, на приёмную антенну приходит не три луча, как изображено на рис. 2, а много больше, следствием чего является размытие минимумов на графике дистанционной зависимости множителя ослабления и изменение периода интерференционных максимумов, что подтверждается данными, приводимыми в [1].

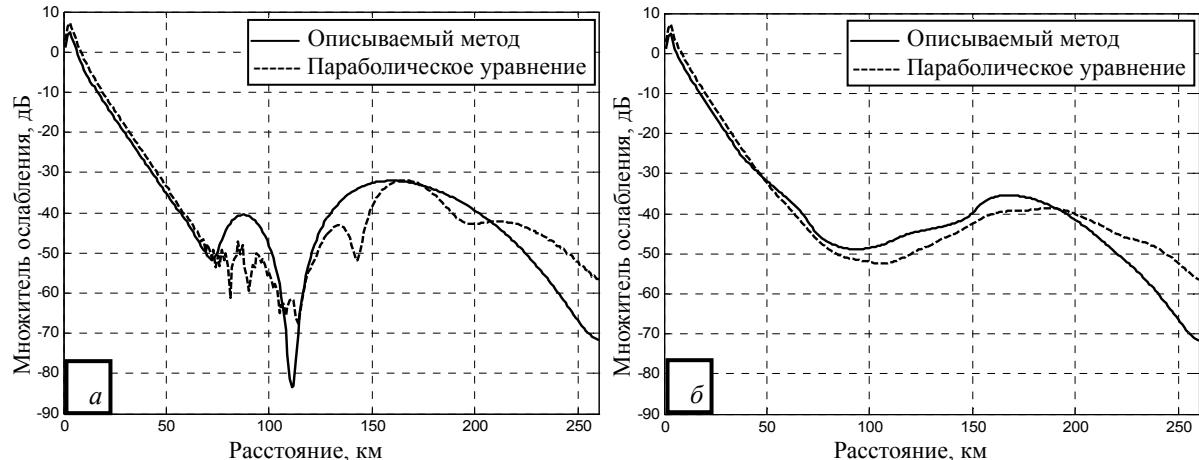


Рис. 3. Дистанционная зависимость множителя ослабления. Частота сигнала 800 МГц, высота нижней границы слоя повышенной рефракции 800 м, толщина слоя 100 м, интенсивность слоя –20 М-ед.

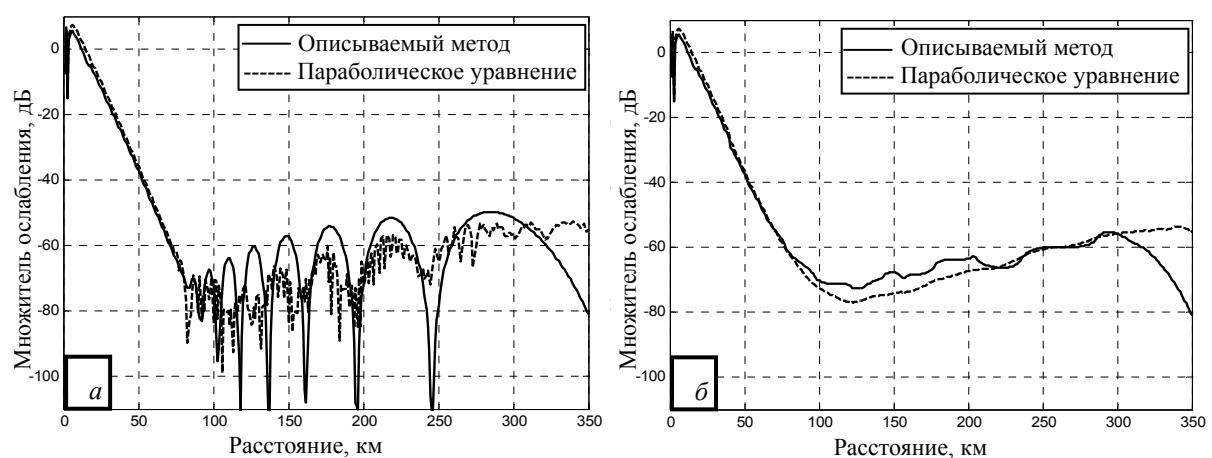


Рис. 4. Дистанционная зависимость множителя ослабления.
Частота сигнала 2 ГГц, высота нижней границы слоя повышенной рефракции 1500 м,
толщина слоя 400 м, интенсивность слоя –20 М-ед.

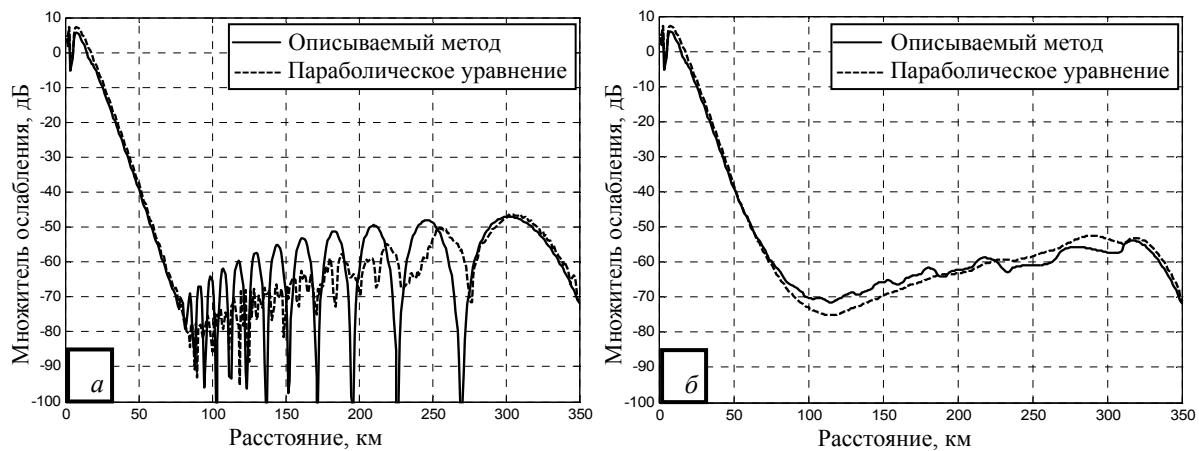


Рис. 5. Дистанционная зависимость множителя ослабления. Частота сигнала 3.11 Гц, высота нижней границы слоя повышенной рефракции 1500 м, толщина слоя 100 м, интенсивность слоя –20 М-ед.

Для сравнения результатов расчёта дистанционной зависимости множителя ослабления описываемым методом с численным решением были проведены расчёты при разных комбинациях параметров инверсного слоя: высота слоя принимала значения 600, 800, 1200 и 1500 метров, толщина слоя – 100, 200, 300 и 400 м, а интенсивность слоя – –6, –10, –15 и –20 М-ед. В итоге были получены 192 дистанционные зависимости множителя ослабления для частот 800 МГц, 3 ГГц, 10 ГГц (по 64 зависимости на каждую частоту). Для каждого случая был рассчитан средний квадрат отклонения результатов относительно численного решения, после чего было проведено усреднение результатов по толщине слоя повышенной рефракции и его интенсивности и вычислено СКО. Полученные данные представлены в таблице.

СКО расчёта множителя ослабления описываемым методом относительно численного метода, дБ

| Частота, МГц | Высота слоя, м | Участок трассы, км | | | | |
|--------------|----------------|--------------------|---------|---------|---------|---------|
| | | 75–150 | 150–200 | 200–250 | 250–300 | 300–350 |
| 800 | 600 | 2,4 | 10,6 | – | – | – |
| | 800 | 2,5 | 3,6 | 11,6 | – | – |
| | 1200 | 3,0 | 3,6 | 3,8 | 11,5 | – |
| | 1500 | 3,8 | 3,5 | 4,7 | 4,7 | 11,4 |
| 3000 | 600 | 3,8 | 5,2 | – | – | – |
| | 800 | 2,6 | 5,4 | 4,4 | – | – |
| | 1200 | 2,7 | 3,1 | 4,9 | 4,3 | – |
| | 1500 | 3,0 | 3,2 | 4,0 | 4,6 | 4,1 |
| 10000 | 600 | 4,4 | 14,4 | – | – | – |
| | 800 | 3,4 | 5,9 | 10,4 | – | – |
| | 1200 | 5,5 | 4,6 | 6,1 | 14,0 | – |
| | 1500 | 8,3 | 6,2 | 5,5 | 7,1 | 12,3 |

Анализ полученных данных показывает, что предложенный метод расчёта множителя ослабления при наличии приподнятого слоя повышенной рефракции даёт результаты, близкие к результатам, полученным при помощи численного метода решения параболического уравнения. Среднее расхождение на частотах 800 МГц и 3 ГГц составляет 3–4 дБ. С увеличением частоты до 10 ГГц среднее расхождение увеличивается до 5–6 дБ.

При переходе из зоны дифракции в зону, где начинает наблюдаться отражённый от инверсного слоя сигнал (участок трассы на расстоянии 100 км от ИРИ), описываемый метод завышает средний уровень сигнала на 2,5–3,5 дБ. Завышение сигнала объясняется тем, что прямая и отражённая от слоя волны складываются некогерентно без учёта фаз.

Отметим, что на участке трассы $(0,9 \dots 1,0)D_{\max}$ СКО расчёта существенно выше, чем на остальных участках, и в отдельных случаях может превышать 14 дБ. Это объясняется тем, что в данной области наблюдается переход в зону ДТР, при этом рассмотренный метод занижает среднее значение множителя отражения на 10–14 дБ. Уменьшение уровня сигнала объясняется тем, что в зоне ДТР уровень поля определяют волны, рассеянные более высокими тропосферными неоднородностями, а описываемый метод не учитывает их.

Заключение. В заключении необходимо отметить, что приведённые точностные характеристики справедливы в случае, когда ширина диаграммы направленности антенны ИРИ не превышает 6° . Для более широких диаграмм сравнение не проводилось. Кроме того, во всех теоретических выкладках предполагалось, что высоты антенн ИРИ и ПрУ примерно одинаковые.

Преимуществом рассмотренного метода является малое время расчёта дистанционной зависимости множителя ослабления по сравнению с численными методами при сопоставимой точности результатов. Например, на расчёт по отражательным формулам тратится около 2–5 с, а численное решение параболического уравнения требует от 10 с до 60 мин (время расчёта сильно зависит от частоты сигнала и длины трассы). Расчёт проводился в программе MATLAB на персональном ЭВМ с процессором Intel(R) Core(TM) i5 CPU 2,67 ГГц и оперативной памятью 16 ГБ. Таким образом, для оперативного прогнозирования уровня сигнала при наличии приподнятых инверсных слоёв предложенный метод является наиболее предпочтительным по соотношению точности и времени расчёта.

Литература

1. Михайлов Н.Ф. Радиометеорологические исследования над морем / Н.Ф. Михайлов, А.В. Рыжков, Г.Г. Щукин. – Л.: Гидрометиздат, 1990. – 208 с.
2. Кижнер Л.И. Волноводные условия распространения УКВ над Тихим океаном в зимний период // Доклады ТУСУР. – 2006. – № 6 (14). – С. 42–46.
3. Recommendation ITU-R P.453-9. The radio refractive index: its formula and refractivity data [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.453-6-199705-S!!PDF-E.pdf, свободный (дата обращения: 14.02.2013).
4. Радиоклиматический тропосферный атлас Тихого океана / Под ред. Г.С. Шарыгина. – Томск: Том. гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, 2000. – 171 с.
5. Stahlhut K.D. Refractivity in the Arctic regions. – Monterey, California: Naval postgraduate school, 2006. – 53 p.
6. Ferrari J.F. Refractive conditions of Amazon environment and its effects on ground and airborne radar and ESM Systems. – Monterey, California: Naval postgraduate school, 2003. – 89 p.
7. Raptis K. Climatological factors affecting electromagnetic surface ducting in the Aegean sea region. – Monterey, California: Naval postgraduate school, 2012. – 191 p.
8. Turk S. Atmospheric effects on communication and electronic warfare systems within Turkey and surrounding areas. – Monterey, California: Naval postgraduate school, 2010. – 91 p.
9. Кижнер Л.И. Параметры вертикального профиля индекса преломления тропосферы над северной частью Атлантического океана / Л.И. Кижнер, Н.А. Мальцева // Вестн. Том. гос. ун-та. – 2012. – № 365. – С. 175–180.
10. Давыденко Ю.И. Дальняя тропосферная связь. – М.: Воениздат, 1968. – 213 с.
11. Калинин А.И. Распространение радиоволн на трассах наземных и космических радиолиний. – М.: Связь, 1979. – 296 с.
12. Кукушкин А.В. Загоризонтное распространение ультракоротких радиоволн над морем / А.В. Кукушкин, В.Д. Фрейлихер, И.М. Фукс // Изв. вузов. Радиофизика. – 1987. – Т. 30, № 7. – С. 811–840.
13. Распространение радиоволн: учебник / О.И. Яковлев, В.П. Якубов, В.П. Урядов, А.Г. Павельев. – М.: ЛЕНАНД, 2009. – 496 с.
14. Арсеньян Т.И. Распространение электромагнитных волн в тропосфере: учебное пособие. – Томск: Том. гос. ун-т. систем упр. и радиоэлектроники, 2006. – 170 с.
15. Исследование распространения радиоволн УКВ-диапазона в районах Мирового океана / В.Л. Костина, И.М. Мыщенко, А.Н. Роенко, С.И. Хоменко // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2009. – Т. 14, №10. – С. 41–53.
16. Levy M. Parabolic equation methods for electromagnetic wave propagation. – London: The Institution of Electrical Engineers, 2000. – 336 p.
17. Акулиничев Ю.П. Программа расчета характеристик поля УКВ по измеренному высотному профилю показателя преломления / Ю.П. Акулиничев, М.Е. Ровкин, М.П. Козлов // Труды XX Всерос. науч. конф. «Распространение радиоволн». – Н. Новгород: Талам, 2002. – С. 493–494.
18. Совместное измерение вертикальных профилей индекса рефракции и множителя ослабления сигнала 3-см диапазона над водной поверхностью / М.Е. Ровкин, Ю.П. Акулиничев, В.А. Хлусов, В.Н. Ковалев, В.А. Бутько, Л.В. Павлова, И.Н. Ваулин, Д.В. Пурик // Доклады ТУСУР. – 2005. – № 4 (12). – С. 61–67.
19. Акулиничев Ю.П. Оценка эффективности прогнозирования зон радиовидимости по имеющимся экспериментальным данным / Ю.П. Акулиничев, И.Н. Ваулин, М.Е. Ровкин // Изв. вузов. Физика. – 2007. – Т. 50, № 5. – С. 87–92.
20. Sevgi L. Groundwave propagation modeling: problem-matched analytical formulations and direct numerical techniques / L. Sevgi, F. Akleman, L.B. Felsen // IEEE ant. and propag. mag. – 2002. – Vol. 44, №1. – P. 55–75.
21. Голев К.В. Расчет дальности действия радиолокационных станций. – М.: Сов. радио, 1962. – 204 с.
22. Красюк Н.П. Корабельная радиолокация и метеорология / Н.П. Красюк, В.И. Розенберг. – Л.: Судостроение, 1970. – 325 с.
23. Фок В.А. Проблемы дифракции и распространения электромагнитных волн. – М.: Сов. радио, 1970. – 520 с.

24. Dockery G.D. An improved impedance-boundary algorithm for fourier split-step solutions of the parabolic wave equation / G.D. Dockery, J.R. Kuttler // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1996. – Vol. 44, № 12. – P. 1592–1599.
25. Акулиничев Ю.П. Влияние поглощающего слоя на численное решение параболического уравнения / Ю.П. Акулиничев, П.В. Абрамов, И.Н. Ваулин // Доклады ТУСУР. – 2007. – № 2 (16). – С. 139–145.
26. Захаров Ф.Н. Оптимизация формы поглощающего слоя при численном решении параболического уравнения / Ф.Н. Захаров, В.С. Беликов, А.А. Васильев // Матер. докл. Всерос. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск: В-Спектр, 2011. – Ч. 1. – С. 57–59.

Захаров Фёдор Николаевич

Аспирант каф. радиотехнических систем ТУСУРа
Тел.: 8-923-417-01-55
Эл. почта: fzakharov89@gmail.com

Крутиков Михаил Владимирович

Зав. лаб. распространения радиоволн НИИ РТС ТУСУРа
Тел.: (382-2) 41-39-69
Эл. почта: rwplab@sibmail.com

Акулиничев Юрий Павлович

Д-р техн. наук, профессор каф. радиотехнических систем ТУСУРа
Тел.: (382-2) 41-36-70
Эл. почта: ayp@rts.rk.tusur.ru

Zakharov F.N., Krutikov M.V., Akulinichev Yu.P.

Estimation of propagation factor in the presence of an elevated atmospheric layer

A simple algorithm for calculating the propagation factor in the presence of radiowave reflection from an elevated atmospheric layer is offered. The results of propagation factor calculation over a series of the sea radio paths using the proposed method are compared with the data obtained from numerical solution of the parabolic equation and the calculation accuracy of former method is estimated.

Keywords: radiowave propagation, propagation factor, atmosphere layer with superrefraction, reflection index.
