

Загоризонтное распространение радиоволн в тропосферных волноводах

М.С. Михайлов, А.А. Волкова, Е.А. Бородко, К.Ю. Кожевников

Национальный исследовательский университет «МЭИ», 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная 17, e-mail volkova-nastua@yandex.ru

В данной работе рассмотрено распространение радиоволн в тропосферном приповерхностном волноводе. Инверсия показателя преломления n с высотой приводит к появлению тропосферных волноводов. В нормальных условиях показатель преломления должен уменьшаться монотонно.

In this paper, of radio waves propagation in a tropospheric elevated-surface duct is considered. The inversion of the refractive index n with altitude leads to the appearance of tropospheric ducts. Under normal conditions, the refractive index should decrease monotonically.

Введение

Максимальная дальность радиолокатора по наводным целям в условиях нормальной тропосферы не может превышать радиогоризонт. Над морской поверхностью могут возникать тропосферные волноводы испарения. В большинстве работ, посвященных распространению радиоволн, основной упор делается на учет влияния волновода испарения [1, 2]. По рекомендациям союза электросвязи принято различать три типа тропосферных волноводов: поверхностный (волновод испарения), приповерхностный и приподнятый. На работу радиолокатора не влияет приподнятый волновод, так как он располагается на высотах порядка нескольких километров. Волновод испарения располагается над поверхностью моря, а его высоты могут достигать нескольких метров. Слои инверсии метеорологических параметров в приподнятых волноводах располагаются до одного километра, одновременно может существовать несколько таких слоев. Вблизи поверхности моря на распространение радиоволн влияют нижние волноводы. В докладе приведены примеры влияния волноводов испарения и приповерхностных волноводов. Приведен метод измерения таких волноводов, по непосредственным измерениям метеопараметров. В работе приводится расчет распространения радиоволн в волноводах при помощи метода параболического уравнения, реализованного на быстром преобразовании Фурье.

1. Постановка исследования

Чтобы учитывать кривизну земли в расчетах вводится приведенный коэффициент преломления воздуха m :

$$m(z) = n(z) + z/a, \quad (1)$$

где a – радиус Земли, а z – текущая высота над морем.

Вследствие малого отличия показателя преломления воздуха от единицы, вводят величину, именуемую «модуль приведенного коэффициента преломления» и показывающую на сколько приведенный показатель преломления, отличается от единицы.

$$M(z) = (m(z) - 1) \cdot 10^6 = N(z) + z \cdot 10^6/a, \quad (2)$$

где N – модуль коэффициента преломления или индекс преломления, показывающий на сколько показатель преломления, отличается от единицы.

Метеорологические параметры окружающей среды связаны с показателем преломления. Существует эмпирическая формула для расчета модуля коэффициента преломления:

$$N = 77,6P/T + 3,73 \times 10^5 e/T^2, \quad (3)$$

где T — температура (в Кельвинах),

P — давление сухого (в гектопаскалях),

e — парциальное давление водяного пара (в гектопаскалях).

Относительная влажность в процентах определяется формулой:

$$h = (e / e_0) \cdot 100\%, \quad (4)$$

где e_0 — давление насыщенного водяного пара.

Инверсии в метеорологических параметрах приводит к инверсии показателя преломления.

Расчет распространения радиоволн в условии неоднородности тропосферы происходит методом параболического уравнения [4]:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial z^2} - 2ik_0 \frac{\partial V}{\partial \rho} + k_0^2 (n^2(\rho, z) - 1)V = 0, \quad (5)$$

где k_0 — волновое число,

ρ — радиальная ось цилиндрической системы координат,

V — распределение огибающей амплитуды электромагнитного поля.

2. Волновод испарения

Инверсия влажности морского воздуха приводит к появлению волновода испарения. Влажность достигает 100% значения непосредственно на поверхности моря. С высотой влажность уменьшается, хотя в нормальных условиях практически не зависит от высоты.

В теоретическом расчете распространения радиоволн в волноводе испарения, как правило, используют вертикальный профиль модуля приведенного показателя преломления $M(z)$, который описывается моделью Паулуса-Ешке (Paulus–Jeshke) [5, 6]:

$$M(z) = M(0) + 0,125 \left\{ z - z_d \cdot \ln \left[(z + z_0) / z_0 \right] \right\}, \quad (1)$$

где z_0 — эквивалентная длина, характеризующая шероховатость и равная $1,5 \cdot 10^{-4}$ м, для спокойного моря, а z_d — высота волновода испарения (в метрах).

В случае применения профиля (6) и идеального возбуждения волновода испарения [7], диапазон дальности работы радиолокатора, излучающего в сантиметровом диапазоне длин волн, в идеальных случаях достигает несколько сотен километров. На рис. 1 изображена кривая, отображающая зависимость модуля приведенного коэффициента преломления от высоты — M -профиль — волновода испарения с высотой 15 м по модели Паулуса-Ешке (6) и распределение поля в таком волноводе по высоте на дальности 100 км от узконаправленной антенны.

К уменьшению дальности действия радиолокационной станции приводят потери в чистом воздухе и в гидрометеорах (рис. 2а), а также рассеяние электромагнитных волн на морских волнах (рис. 2б) и на турбулентности в тропосфере [8,9]. Более подробно в изложено в [10, 11].

Влияние турбулентности можно рассмотреть, как искажение профиля (6). Для простоты рассмотрим влияние искажения в виде протяженного слоя с постоянным, $\Delta N = \pm 1$ на рис. 3 изображены M -профили волноводов с искажением. На рис. 1 изображено распределение поля по высоте при неискаженном профиле волновода испарения. Слой с $\Delta N = -1$, влияние которой изображено на рис. 3, можно назвать фокусирующим, поскольку максимум поля увеличился, и величина вытекающего из волновода поля уменьшилась. Для слоя с $\Delta N = +1$ значение вытекающего поля выше, а максимум поля уменьшился почти в 7 раз.

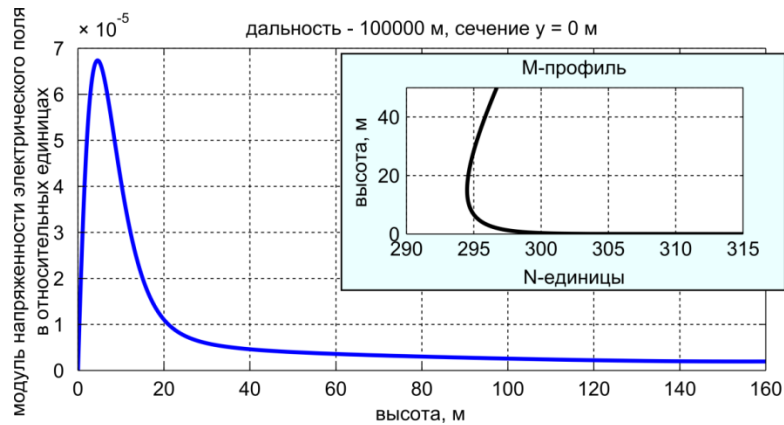


Рис. 1. Распределение поля по высоте на дальности 100 км от антенны в волноводе, параметры которого представлены на М–профиле.

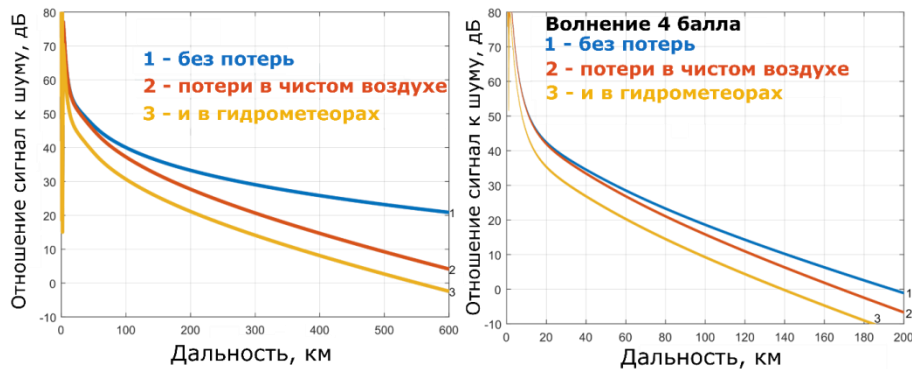


Рис. 2. Влияние при распространении радиоволн в волноводе испарения потерь в чистом воздухе, гидрометеорах и за счет рассеяния на морских волнах.

3. Приповерхностный тропосферный волновод

Температурная инверсия также может вызывать изменение индекса преломления. Если влияние сферичности слабее, чем приведенные выше изменения, то наблюдается положительная рефракция, и как следствие, возникновение поверхностного тропосферного волновода. На рис. 4 приведены М–профили приповерхностных волноводов с различными градиентами на высоте 50 (рис. 4а) и 30 метров (рис 4б).

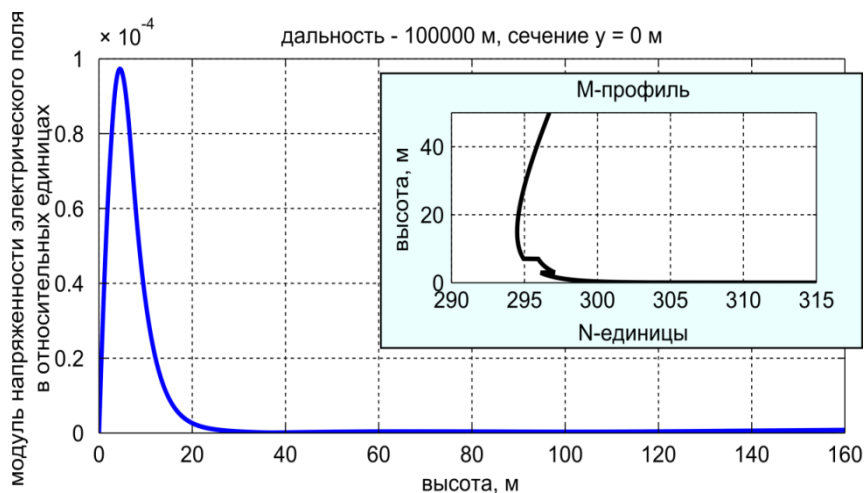


Рис. 3. Распределение поля по высоте на дальности 100 км от антенны в волноводе с различными протяженными турбулентными слоями, параметры представлены на М–профиле: волновод испарения высотой 15 м с фокусирующим слоем $\Delta N = -1$.

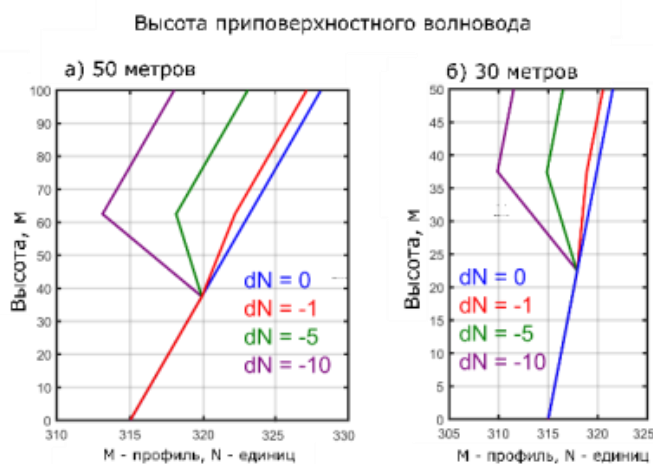


Рис. 4. М–профиль волноводов с различным градиентом при высоте приповерхностного волновода а) 50 и б) 30 метров.

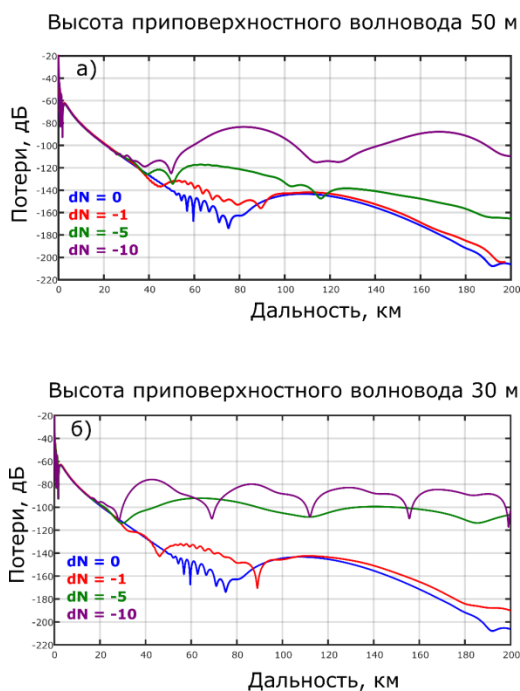


Рис. 5. Влияние отрицательного градиента показателя преломления на распространение радиоволн, при высоте приповерхностного волновода а) 50 и б) 30 метров. М–профиль волноводов представлен на рис. 4.

На рис. 5 показано влияние отрицательного градиента показателя преломления на распространение радиоволн. Изменение на 1 N–единицу (одна миллионная n) показателя преломления соответствует изменению температуры на 1,2 К или изменению влажности около 0,7%.

Стоит отметить, что при высоте приповерхностного волновода 30 метров рис. 5б достаточного меньшего градиента показателя преломления для возникновения эффекта волноводного распространения радиоволн, нежели при 50, изображенном на рис. 4а.

Многомодовое распространение показано на рис. 5. Моды высших типов возбуждаются в волноводе при значительном градиенте показателя преломления (например, на рис. 4 для фиолетовой линии градиент равен $-10N$ -единиц). Моды суммируются, но имеют разные постоянные распространения. Эффектом такого

суммирования становится периодический характер — чередование максимумов и минимумов по дальности на определенной высоте.

4. Учет ширины спектра сигнала

Типичная активная радиотехническая система состоит из антенной системы, блоков генерации сигналов, излучения, приема и их обработки. Электромагнитное излучение от передающей антенны РЛС к приемной распространяется в окружающей среде и отражается от целей, которые влияют на свойства сигналов.

В качестве зондирующего сигнала на этапе обнаружения объектов радиолокационного наблюдения используется сигнал с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ). С выхода оптимального приемника поступает сжатый ЛЧМ сигнал. Моделирование проводится исходя из линейности задачи.

Пусть окружающая среда имеет линейные и стационарные свойства. Под этим понимается, что ε, μ, σ не зависят от амплитуды электромагнитного поля и не меняются со временем. Независимость от времени среды достигается малой длительностью сигнала, во время прохождения которого среда не успевает измениться. Однако при этом они могут зависеть от частоты, т.е. среда может быть дисперсионной.

Длительность сжатого сигнала составляет величину обратную ширине спектра сигнала. В оптимальном приемнике используется фильтр коррекции боковых лепестков автокорреляционной функции, поэтому форма сжатого сигнала близка к гауссовой и имеет наносекундную длительность.

Плавная форма импульса хорошо подходит для программы электромагнитного моделирования, созданной на основе параболического уравнения. Рассчитывается распространение сжатого сигнала. Пусть такой сигнал $s_{ex1}(t)$ подан на вход передающей антенны. Спектр сигнала является комплексным.

На вход передающей антенны предполагается подавать различные входные сигналы и наблюдать на выходе приемной антенны ответные сигналы. Помимо ЛЧМ сигнала в радиолокации также используют сигнал с фазовой манипуляцией (ФМн). Сжатый ФМн имеет треугольную форму, с треугольными боковыми лепестками [13]. Методом параболического уравнения достаточно рассчитать распространение для сигнала гауссовой формы. Для расчета распространения других входных сигналов достаточно знать импульсную характеристику или передаточную функцию:

$$H(n) = \frac{S_{вых}(n)}{S_{ex}(n)}, \quad (7)$$

где $S_{ex}(n)$ и $S_{вых}(n)$ — это массивы с отсчетами спектральной плотности входного и выходного сигналов. Если имеются отсчеты спектральной плотности другого входного сигнала $S_{ex2}(n)$, то можем найти спектральную плотность выходного сигнала:

$$S_{вых2}(n) = H(n) \cdot S_{ex2}(n). \quad (2)$$

Временная зависимость сигнала на выходе находится, используя обратное БПФ:

$$z_{вых2}(k) = F^{-1} \{ 2 \cdot S_{вых2}(n) \}, \quad (3)$$

Таким образом $s_{вых2}(t) = \text{Re} \left(z_{вых2}(t) \right)$, а $A(t) = |z_{вых2}(t)|$ — это огибающая сигнала.

Заключение

Показано распространение радиоволн в условиях возникновения волновода испарения, а также приповерхностных тропосферных волноводов. Полученные результаты представляются важными для постановки и интерпретации экспериментов по наблюдению процессов загоризонтное распространение радиоволн над морем. В

дальнейшем рационально дополнить диолокационный комплекс установкой для измерения профиля показателя преломления с помощью датчиков и компьютерной программы для расчета радиолинии по методу параболического уравнения в целях прогнозирования функционирования РЛС.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (проект №8.9598.2017/БЧ).

Литература

1. Kenneth D.A. The RED Experiment. An Assessment of boundary Layer Effects in a Trade Winds Regime on Microwave and Infrared over the Sea. // Bulletin of American Meteorological Society, Sept.2004.–pp.1355–1365.
2. French G. Propagation of 10,6 GHz over a long Path in the Tropical Evaporation Duct. / Kerans A., Woods G., Lensson E., French G. // Workshop on the Applications of Radio Science. – Leura, NSW Australia (20 – 22 February 2002).
3. Frederickson P. Improving the Characterization of the Environment for AREPS Electromagnetic Performance Predictions / Weather Impacts Decision Aids (WIDA) Workshop. 15 March 2012, Reno, NV.
4. Levy M. Parabolic equation methods for electromagnetic waves propagation. London, UK, IEE, 2000.
5. Paulus R.A. Practical application of an evaporation duct model / R.A. Paulus // Radio Science. 1985. V. 20. № 4. – p. 8.
6. Jeske H. State and limits of prediction methods of radar wave propagation conditions over sea // Modern Topics in Microwave Propagation and Air–Sea Interaction. IEEE, 1973, pp. 131–148.
7. Mikhailov M.S., Permyakov V.A., Makhlov A.V. Limitations on the Range of Radiosystems in the Duct of Evaporation / Russian Physics Journal, 2016, V. 59, №12-3, P. 140–144.
8. Chou Y.-H., Kiang J.-F. Effect of Turbulence on Wave Propagation in Evaporation Ducts above a Rough Sea Surface. / Forum for Electromagnetic Research Methods and Application Technologies, 2014, No.1.
9. Chou Y.-H., Kiang J.-F. Ducting and Turbulence Effects on the Radio-Wave Propagation in an Atmospheric Boundary Layer. / Progress in Electromagnetic Research, B, Vol. 60, 301-315, 2014.
10. Permyakov V.A., Mikhailov M.S., Borodko Y.A. Propagation of Radio Waves in the Presence of a Combined Tropospheric Duct / 2017 13th International Conference on Advanced Technologies, Systems and Services in Telecommunications (TELSIKS), Serbia, Niš, 18–20 October, 2017 Proceedings of Papers, pp.109–110.
11. Isakov M.V., Makhlov A.M., Mikhailov M.S., Permyakov V.A. On the Effect of Refractive Index Perturbations on Propagation of Radio Waves in the Evaporation Duct // Progress In Electromagnetics Research Symposium Abstracts, St. Petersburg, Russia, 22–25 May 2017, p.850.
12. Ситников Н.М., Азаров А.С., Чекулаев И.И., Акмулин Д.В., Ситникова В.И., Катюнин А.А., Улановский А.Э. Перспективы использования беспилотных летательных аппаратов для метеорологического и экологического мониторинга окружающей среды / Беспилотная авиация — 2016, 3-я международная конференция. –М. 21–22 апреля 2016 г.
13. Баскаков А.И., Жутяева Т.С., Лукашенко Ю.И. Локационные методы исследования объектов и сред. Учебник для вузов / Под ред. проф. А.И. Баскакова. М.: Изд. центр «Академия», 2011.