

О ДИАГНОСТИКЕ ТРОПОСФЕРЫ ПО РАДИОЗАХОДАМ УКВ ИСТОЧНИКА**Введение**

Для экспериментального изучения рефракции радиоволн в атмосфере Земли применяют методы наблюдения радиоисточников, расположенных на ИСЗ, под различными зенитными углами [1-3]. Физической характеристикой, допускающей постановку и решение обратной задачи рефракции при положительных углах места радиоисточника, является угломестная зависимость угла рефракции [4-7]. Модификация метода радиопросвечивания, основанная на идее просвечивания на затменных радиотрассах (при отрицательных углах места источника), получила название спутникового радиозатменного метода мониторинга атмосферы. Экспериментальные исследования показали, что этот метод является эффективным способом диагностики и позволяет получать данные о высотных профилях параметров атмосферы. Особенности и этапы развития радиозатменного метода на радиотрассах «спутник-спутник» описаны в обзоре [8]. Обращалось внимание на эффективность диагностики параметров атмосферы Земли по характеристикам коротковолнового поля спутникового излучателя в области тени и полутени на радиотрассах «спутник-земля» [5, 9]. Физической характеристикой, обеспечивающей диагностику рефракционных свойств атмосферы Земли, является угломестная зависимость множителя ослабления радиосигнала. В настоящей работе обсуждается возможность использования в качестве признаков распознавания рефракционных свойств пространственных градиентов множителя ослабления. Применительно к радиотрассам, реализуемым при радиозаходе (радиовосходе) коротковолнового излучателя относительно наземного приемника, проведен теоретический анализ дифракционного поля вблизи радиогоризонта с учетом рефракционных явлений. Характеристикой радиосигнала, несущей информацию о среде распространения, является множитель ослабления, а параметром модели, определяющим состояние азимутально-однородной атмосферы, – высотный градиент коэффициента преломления. При радионаблюдении геостационарного ИСЗ переход из области полутени в область тени осуществляется перемещением приемника в вертикальном или горизонтальном направлениях. При радионаблюдении навигационных спутников системы GPS изменение радиотрассы с «открытой» на «закрытую» осуществляется за счет движения радиоисточника. Анализ высотного и дистанционного градиентов множителя ослабления дифракционного поля в точке наблюдения сигнала проведен для случая линейного изменения коэффициента преломления с высотой.

Постановка задачи

Достаточно полное описание влияния рефракционных свойств тропосферы на дифракционное поле было проведено В.А.Фоком, который рассмотрел идеализированную модель дифракции электромагнитных волн на гладкой сфере, получил решение задачи через функции Эйри [10] и обосновал возможность применения концепции эквивалентного радиуса. На практике [3, 5] анализируется радиоизлучение ИСЗ, находящихся на значительном (до 40000 км) удалении от Земли. Численный анализ дифракционного поля по теории [10] при таких дистанциях представляет значительные трудности. Упрощенный анализ можно провести, пренебрегая влиянием верхних слоев атмосферы на распространение радиоволн, рассматривая, например линейную модель сферически-слоистой неоднородной тропосферы. Анализу множителя ослабления дифракционного поля и его пространственных градиентов на основе теории [10] для такого случая при расположении источника вблизи радиогоризонта посвящена работа.

Анализ проведен в независимых переменных R , h_1 , определяющих горизонтальное (вдоль поверхности Земли) расстояние между приемником и источником и высоту приемника над поверхностью Земли. Предполагается, что коротковолновый ($\lambda \approx 3$ см) источник

радиоизлучения (электрический диполь вертикальной поляризации) расположен на высоте $h_2 = 10$ км, соответствующей условной границе тропосферы. Вертикальный профиль коэффициента преломления предполагается линейным с градиентом g_n . Принятые в работе значения g_n допускают (начиная с некоторой высоты) наличие области со значением коэффициента преломления, меньшим единицы. Такой идеализированный характер модели предопределяет высокую методическую погрешность исследования. Однако на начальном этапе анализ линейной модели может быть полезен для выяснения качественных закономерностей радиозахода. В работе рассматривается только случай нормальной рефракции. Местоположение приемника считается заданным в области тени или полутени источника на дистанции $R \geq R_0$, где R_0 – дальность радиогоризонта [9, 10]. В коротковолновом диапазоне при линейном законе убывания коэффициента преломления с высотой, как известно [9, 10],

$$R_0(h_1, h_2, g_n) = \sqrt{2a_0} (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}), \quad (1)$$

где $a_0 = \frac{a}{1 + ag_n}$; a – радиус Земли; a_0 – эквивалентный радиус.

Электродинамически строгое решение В.А. Фока выражается бесконечной суммой пространственных гармоник с характеристическими числами, определяемыми собственными функциями краевой задачи [10-12]. Зависимости множителя ослабления $V(R, h_1)$ и градиентов

$\frac{\partial V_{об}}{\partial R}$, $\frac{\partial V_{об}}{\partial h_1}$ определялись в работе численно с помощью программ [13]. Количество учтенных

при численном расчете гармоник определялось относительной точностью вычисления множителя ослабления, равной 10^{-6} . Индекс *об* здесь и далее означает, что зависимости множителя ослабления рассматриваются в децибелах и градиенты множителя ослабления определены для логарифмических функций.

Численные результаты

Зависимости градиента $\frac{\partial V_{об}}{\partial R}$ от дистанционного смещения приемника относительно радиогоризонта $\Delta = R - R_0$ для двух положений приемника по высоте ($h_1 = 6$ м; 10 м) представлены на рис. 1 для случаев стандартной рефракции $g_n = -4 \cdot 10^{-5} \text{ км}^{-1}$ (сплошные кривые) и суперрефракции $g_n = -1 \cdot 10^{-4} \text{ км}^{-1}$ (штриховые кривые). Положительные значения Δ соответствуют области тени и полутени (при малых значениях Δ). Из рис. 1 видно, что дистанционный градиент практически не зависит от положения приемника в зоне тени и полутени по высоте и слабо зависит от Δ в области глубокой тени. Зависимость дистанционного градиента множителя ослабления от градиента коэффициента преломления g_n выражена существенно.

Высотные зависимости градиента $\frac{\partial V_{об}}{\partial h_1}$ при $\Delta = R - R_0 = 4$ км для значений $g_n = 0; -4 \cdot 10^{-5} \text{ км}^{-1}, -1 \cdot 10^{-4} \text{ км}^{-1}$ представлены на рис. 2. Кривые $\frac{\partial V_{об}}{\partial h_1}(h_1)$, рассчитанные для значений $\Delta = 0; 2$ км, оказались практически совпадающими с кривыми, приведенными на рис. 2.

Из рис. 2 видно, что градиент $\frac{\partial V_{об}}{\partial h_1}$ в области тени и полутени существенно зависит от местоположения приемника по высоте h_1 и от градиента коэффициента преломления g_n . Рис. 2, таким образом, отражает существенное влияние рефракционных свойств атмосферы

на фокусировку дифракционного поля. Чувствительность высотного градиента множителя ослабления к изменению g_n , как видно из рис. 1, 2, в области полутени и глубокой тени на несколько порядков превышает чувствительность дистанционного градиента.

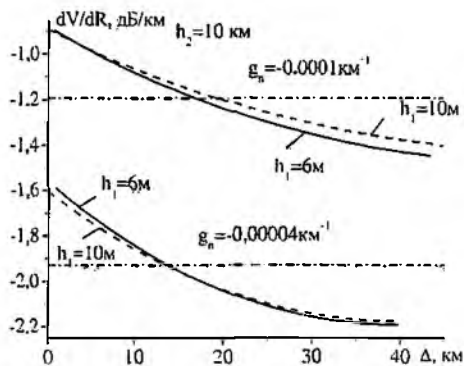


Рис. 1

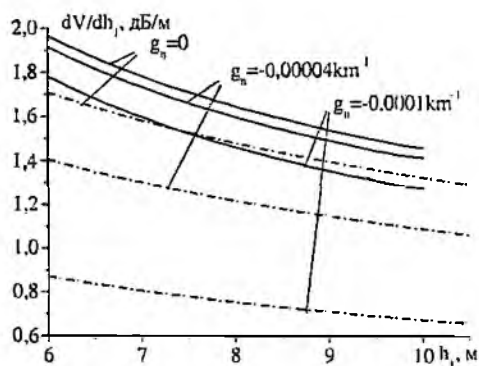


Рис. 2

Зависимости дальности радиогоризонта R_0 от градиента коэффициента преломления, рассчитанные по (1) для двух высот приемника ($h_1 = 6$ м; 10 м) представлены на рис. 3.

Аналогичные зависимости, полученные при численных расчетах по более строгим соотношениям [10], подтверждают применимость геометрикооптического описания в данном случае.

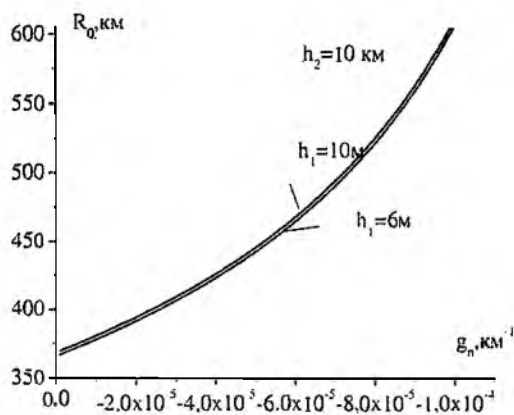


Рис. 3

Зависимости градиента $\frac{\partial V_{\partial \delta}}{\partial R}$ от градиента коэффициента преломления g_n в интервале $0 \div -0,0001 \text{ км}^{-1}$ для четырех случаев расположения приемника относительно радиогоризонта ($\Delta = 0; 10; 15; 20$ км) при фиксированной высоте $h_1 = 10$ м представлены на рис. 4 (штриховые линии). Дистанция $R = R_0 + \Delta$ меняется при изменении градиента g_n и высоты h_1 в соответствии с рис. 3. Рис. 4 отражает слабую зависимость градиента $\frac{\partial V_{\partial \delta}}{\partial R}$ от дистанции в области тени ($\Delta > 10$ км).

Зависимости градиента $\frac{\partial V_{\partial \delta}}{\partial h_1}$ от градиента коэффициента преломления для случаев $h_1 = 6; 10$ м при $\Delta = 4$ км и отрицательных значениях множителя ослабления сигнала представлены на рис. 5 (штриховые линии).

Из рис. 5 видно, что градиент $\frac{\partial V_{\text{дб}}}{\partial h_1}$ существенно зависит от положения приемника по высоте. Из сравнения штриховых кривых рис. 4 и 5 следует, что чувствительность градиента $\frac{\partial V_{\text{дб}}}{\partial h_1}$ к изменению градиента коэффициента преломления существенно (более чем на два порядка) превышает чувствительность градиента $\frac{\partial V_{\text{дб}}}{\partial R}$.

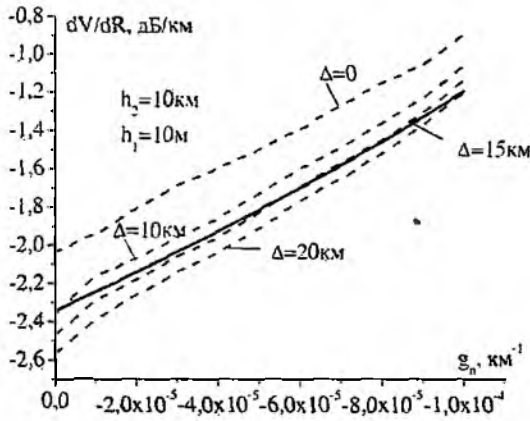


Рис. 4

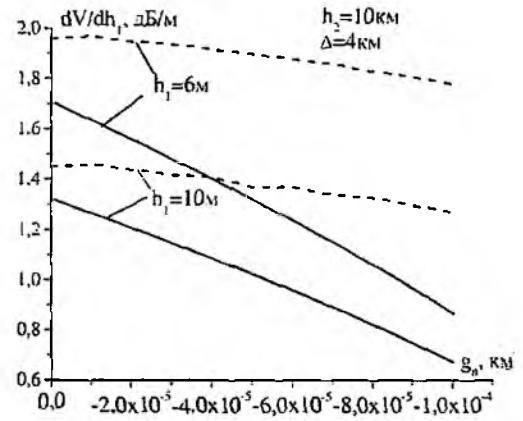


Рис. 5

Высокая чувствительность вертикального градиента множителя ослабления к изменению градиента коэффициента преломления позволяет рассматривать его в качестве информативного признака распознавания линейно стратифицированных моделей земной атмосферы.

Возникает вопрос о возможности оценки градиентов множителя ослабления дифракционного поля с помощью упрощенных соотношений [12, 14], предполагающих экспоненциальный характер дистанционной зависимости множителя ослабления в зонах тени и полутени. Эти соотношения имеют вид

$$V_{\text{дб}} = V_{0\text{дб}} - \frac{17,1}{\sqrt{h_0}} (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}) \frac{R - R_0}{R_0} \quad (2)$$

$$\frac{\partial V_{\text{дб}}}{\partial R} = -\frac{17,1}{\sqrt{2a_3 h_0}} = -17,1 \left[\frac{\pi^2 (1 + a g_n)^4}{a^4 \lambda^2} \right]^{1/6} \quad (3)$$

$$\frac{\partial V_{\text{дб}}}{\partial h_1} = \frac{17,1}{2\sqrt{h_1 h_0}} = \frac{17,1}{2\sqrt{h_1}} \left[\frac{8\pi^2 (1 + a g_n)^4}{a \lambda^2} \right]^{1/6} \quad (4)$$

где $V_{0\text{дб}}$ – множитель ослабления на расстоянии R_0 ; $h_0 = \sqrt[3]{\frac{a_3 \lambda^2}{8\pi^2}}$.

В [12, 14] показано, что соотношение (2) с достаточной для практических целей точностью (до 2 дБ) описывает множитель ослабления в зонах тени и полутени в диапазоне ультракоротких волн при немалых высотах расположения антенн и большом расстоянии между излучателем и приемником. Из (3) следует, что в этом приближении дистанционный градиент не зависит от высот расположения приемника и источника и от расстояния между ними.

Соответствующие зависимости градиентов $\frac{\partial V_{\text{дб}}}{\partial R}(\Delta)$, $\frac{\partial V_{\text{дб}}}{\partial h_1}(h_1)$ представлены на рис. 1, 2 штрихпунктирными линиями. Из рис. 1 видно, что аппроксимация (2) с хорошей точностью (до 0,3 дБ/км) определяет усредненный по дистанции дистанционный градиент множителя

ослабления. Погрешность оценки высотного градиента по соотношению (4) достигает 1,0 дБ/м. Зависимости градиентов множителя ослабления от градиента g_n , рассчитанные по (3), (4), представлены на рис. 4, 5 сплошными линиями. Высотный градиент был рассчитан для значений $h_1 = 6$ м; 10 м.

Из рис. 4,5 видно, что соотношения (3), (4) правильно передают качественный характер зависимостей градиентов множителя ослабления от градиента g_n . Формальное решение «обратной» задачи определения коэффициента преломления g_n по дистанционному и высотному градиентам определяется аналитическими соотношениями

$$g_n = \sqrt{\frac{\lambda}{\pi}} \left(\frac{1}{17.1} \left| \frac{\partial V_{об}}{\partial R} \right| \right)^{3/2} - \frac{1}{a}, \quad (5)$$

$$g_n = \sqrt{\frac{\lambda}{\pi}} \left(\frac{1}{17.1} \sqrt{\frac{2h_1}{a}} \frac{\partial V_{об}}{\partial h_1} \right)^{3/2} - \frac{1}{a}. \quad (6)$$

Отличие значений дистанционного градиента множителя ослабления, полученных приближенным методом [14] и в результате более строгих вычислений, не превышает 0,05 дБ/км в области тени, что позволяет оценивать значение градиента коэффициента преломления тропосферы по соотношению (5) с абсолютной погрешностью $\approx 1 \cdot 10^{-5} \text{ км}^{-1}$. Погрешность определения высотного градиента множителя ослабления приближенным методом составляет ≈ 1 дБ/м. Постановка и решение обратной задачи по соотношению (6) при такой погрешности не имеют практического смысла. Высокая чувствительность вертикального градиента множителя ослабления к изменению градиента коэффициента преломления на начальном этапе, однако, позволяет рассматривать его в качестве информативного признака распознавания линейно стратифицированных моделей земной атмосферы.

Заключение

Проведенный численный анализ пространственных градиентов множителя ослабления радиосигнала УКВ в области тени и полутени спутниковой трассы радиопросвечивания показал, что результаты расчета по упрощенным (в приближении эквивалентного радиуса) соотношениям [12, 14] и по более строгой теории [10, 11] находятся в качественном соответствии. Высотный градиент множителя ослабления радиосигнала в области тени и полутени является более информативным признаком диагностики, поскольку его чувствительность к изменению g_n на два порядка превышает чувствительность дистанционного градиента. Упрощенные соотношения можно использовать только для качественной оценки градиента коэффициента преломления на начальном этапе исследований. Восстановление градиента коэффициента преломления g_n по упрощенным соотношениям для дистанционного градиента множителя ослабления возможно с абсолютной точностью до $1 \cdot 10^{-5} \text{ км}^{-1}$. Восстановление градиента коэффициента преломления g_n по упрощенным соотношениям для высотного градиента множителя ослабления нежелательно. В целом проведенные расчеты подтверждают возможность использования пространственных градиентов множителя ослабления радиосигнала для радиозатменного мониторинга земной атмосферы.

Список литературы: 1. Колосов М.А., Шабельников А.В. Рефракция электромагнитных волн в атмосферах Земли, Венеры и Марса. М.: Сов. радио, 1976, 219с. 2. Яковлев О. И. Распространение радиоволн в космосе. М.: Наука, 1985. 216 с. 3. Колосов М.А., Павельев А.Г. Радиопросвечивание атмосферы при помощи источников искусственного и естественного происхождения // Радиотехника и электроника. 1982. Т. 27, №12. С.2310-2317. 4. Павельев А.Г. Решение обратной задачи рефракции // Радиотехника и электроника. 1982. Т. 27. №5. С.1037-1039. 5. Синицкий В.Б., Тургенев И.С., Ширманова С.А. Измерение и расчет углов атмосферной рефракции по радиозаходам ИСЗ над морем // Радиотехника. 1992. Вып.96. С.52-60. 6. Алексеев Г.А., Ширманова С.И. О возможностях интерферометрического метода диагностики атмосферы, использующего излучение ИСЗ // Радиотехника. 1993. Вып. 96.

С. 38–49. 7. *Alexeev G.A., Kusaykin A.P. and Poyedinchuk A.Ye.* An analytical numerical method for solution of refraction inverse problem // *Telecommunications and Radio Engineering*. 1999. Vol. 53. No 11, P.1-11. 8. *Яковлев О.И., Павельев А.Г., Матюгов С.С.* Развитие спутникового радиозатменного метода мониторинга атмосферы и ионосферы // *Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники*. 2002. №9. С.8-16. 9. *Аренберг А.Г.* Распространение дециметровых и сантиметровых волн. М.: Сов. радио. 1957. 303с. 10 *Фок В.А.* Проблемы дифракции и распространения электромагнитных волн. М.: Сов. радио. 1970. 517с. 11. *Виноградова М.Б., Семенов А.А.* Основы теории распространения ультракоротких радиоволн в тропосфере. М.: Изд-во Академии наук СССР. 1963. 191с. 12. *Калинин А.И.* Распространение радиоволн на трассах наземных и космических радиолиний. М.: Связь. 1979. 296с. 13. *Белоброва М.В., Иванов В.К., Кукушкин А.В. и др.* Пакет программ для диагностики условий распространения ультракоротких радиоволн над морем // *Изв. вузов. Радиофизика*. 1990.-Т.33, №12. С.1315-1319. 14. *Калинин А.И.* К расчету напряженности поля в зонах тени и полутени при распространении ультракоротких волн вдоль гладкой сферической поверхности Земли // *Радиотехника*. 1956.-Т.11, №6. С.43-49.

*Харьковский национальный
университет радиоэлектроники*

Поступила в редколлегию 23.03.2009