

Том II, с. 453–456

УДК: 537.877

МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК РАСПРОСТРАНЕНИЯ УКВ В РАЗЛИЧНЫХ РАДИОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ НА ОСНОВЕ МЕТОДА НОРМАЛЬНЫХ ВОЛН

В. А. Светличный, О. В. Смирнова

АО «СПИИРАН-Научно-техническое Бюро Высоких технологий»,
199178, г. Санкт-Петербург, 14-линия Васильевского острова, 39
E-mail: sov@oogis.ru

Аннотация. На основе метода нормальных волн проведено исследование закономерностей формирования и характеристик распространения УКВ в неоднородной тропосфере для трилинейной модели вертикального профиля индекса преломления.

Ключевые слова: тропосферные радиоволны; трилинейная модель волновода; метод нормальных волн

CHARACTERISTICS OF ULTRAHIGH FREQUENCY RADIO WAVES PROPAGATION MODELLING IN VARIOUS RADIO-METEOROLOGICAL CONDITIONS ON THE BASIS ON MODE THEORY

V. A. Svetlichny, O. V. Smirnova

Abstract. The study of regularities of ultrahigh frequency waves forming and their propagation characteristics in inhomogeneous troposphere on the basis of mode theory is presented. The trilinear model of vertical profile of refractive index is used.

Keywords: tropospheric radio wave propagation; trilinear duct model; mode theory

Введение

В настоящей работе на основе метода нормальных волн (МНВ) исследуются закономерности формирования и характеристики распространения УКВ в неоднородной тропосфере на протяженных загоризонтных трассах на примере трилинейной модели вертикального профиля индекса преломления среды $N(z)$, позволяющей описать как приповерхностные, так и приподнятые волноводы. При этом используется созданный авторами программный комплекс для ЭВМ, а также предложенный ими новый метод нахождения постоянных распространения нормальных волн для кусочно-линейных профилей $N(z)$ [1]. Ранее трилинейная модель $N(z)$ использовалась в работе [2], однако в ней не приведены окончательные формулы для функции ослабления поля, поэтому пришлось решать краевую задачу теории электромагнитного поля заново. В работе используются обозначения, принятые в книге В.А. Фока [3], задача решается в декартовой системе координат, кривизна Земли учитывается в параболическом приближении, в качестве источников поля служат вертикальные электрический и магнитный диполи, зависимость поля от времени – гармоническая ($e^{-i\omega t}$).

Исходным в задаче является уравнение Гельмгольца для однокомпонентного потенциала Герца $\Pi = \text{Pe}_z$:

$$\frac{\partial^2 \Pi}{\partial z^2} + \Delta_{\perp} \Pi + k_0^2 [1 + 2M(z)] \Pi = -A_0 \delta(\mathbf{r}) \delta(z - z_0) \quad (1)$$

где $A_0 = M_0$ – комплексная амплитуда дипольного момента магнитного диполя (в случае электрического диполя $A_0 = P_0/\varepsilon_0$), вертикальный профиль модифицированного индекса преломления описывается формулой

$$M(z) = N(z) + \frac{z}{a} = \begin{cases} N_1 + g_1 z, & 0 \leq z \leq h_1; \\ N_2 + g_2 z, & h_1 \leq z \leq h_2; \\ g_3 z, & z \geq h_2. \end{cases} \quad (2)$$

На подстилающей поверхности $z = 0$ задаются импедансные граничные условия, при $z \rightarrow +\infty$ – условия излучения в трактовке В.А. Фока.

Опуская детали решения граничной задачи, приведем окончательные расчетные формулы для функции ослабления поля $V(x, y, y_0)$, связанной с потенциалом Герца соотношением $\Pi = \frac{A_0 \exp(ik_0 r)}{4\pi r} V(x, y, y_0)$:

$$V(x, y, y_0) = 2\sqrt{i\pi x} \sum_{s=1}^{\infty} \Lambda_s \exp(it_s x) f_s(y) f_s(y_0); \quad (3)$$

$$f_s(y) = \frac{i}{2} \left[F_1^{(0)} w_2 \left(\frac{t_s - y}{p_1^2} \right) - F_2^{(0)} w_1 \left(\frac{t_s - y}{p_1^2} \right) \right], \quad 0 \leq y \leq y_{h1};$$

$$f_s(y) = \left\{ \left[F_{22}^{(1)} F_1^{(0)} - F_{21}^{(1)} F_2^{(0)} \right] w_1 \left(\frac{t_s - y_2}{p_2^2} - p_2 y \right) - \left[F_{12}^{(1)} F_1^{(0)} - F_{11}^{(1)} F_2^{(0)} \right] w_2 \left(\frac{t_s - y_2}{p_2^2} - p_2 y \right) \right\}, \quad (4)$$

$$y_{h1} \leq y \leq y_{h2}$$

$$f_s(y) = 2i \frac{p_1 F_2^{(0)} w_1 (t_s - y_3 - y)}{p_2 F_{12}^{(2)} F_{12}^{(1)} - F_{11}^{(2)} F_{22}^{(1)}}, \quad y \geq y_{h2}$$

$$\Lambda_s^{-1} = \frac{1}{p_1} \left(\frac{t_s - y_1}{p_1^2} - \tilde{q}^2 \right) + \left(\frac{t_s - y_2}{p_2^2} - \frac{t_s - y_1}{p_1^2} \right) f_s^2 \left(\frac{t_s - y_2}{p_2^2} - p_2 y_{h1} \right) + p_1^2 \left(\frac{1}{p_1^3} - \frac{1}{p_2^3} \right) \times \\ \times \left[f_s' \left(\frac{t_s - y_2}{p_2^2} - p_2 y_{h1} \right) \right]^2 + \left(t_s - y_{h2} - \frac{t_s - y_2}{p_2^2} \right) f_s^2 (t_s - y_3 - y_{h2}) + \left(\frac{1}{p_2^3} - 1 \right) [f_s' (t_s - y_3 - y_{h2})]^2 \quad (5)$$

$$F_{nm}^{(1)} = w_n'(\tilde{t}_2) w_m(\tilde{t}_1) - \frac{p_1}{p_2} w_n(\tilde{t}_2) w_m'(\tilde{t}_1), \quad F_{nm}^{(2)} = \frac{1}{p_2} w_n'(\tilde{t}_4) w_m(\tilde{t}_3) - w_n(\tilde{t}_4) w_m'(\tilde{t}_3)$$

$$F_n^{(0)} = w_n'(\tilde{t}_0) - \frac{q}{p_2} w_n(\tilde{t}_0), \quad \tilde{t}_0 = \frac{t_s - y_1}{p_1^2}, \quad \tilde{t}_1 = \tilde{t}_0 - p_1 y_{h1}, \quad t_{2,3} = \frac{t_s - y_2}{p_2^2} - p_2 y_{h1,2}, \quad \tilde{t}_4 = t_s - y_{h2}. \quad (6)$$

Здесь x, y, y_0 – приведенные горизонтальная дальность и высоты источника и точки наблюдения, $w_{1,2}$ – функции Эйри [3], Λ_s – коэффициенты возбуждения нормальных волн, $f_s(y)$ – высотные множители, $y_j = 2m^2 N_j$ ($j = 1, 2, 3$), $y_{h1,2} = k_0 h_{1,2}/m$, $m = \sqrt[3]{k_0 a_M/2}$, $p_{1,2} = \sqrt[3]{g_{1,2}/g_3}$, $a_M = g_3^{-1}$ – эквивалентный радиус Земли. Комплексные постоянные распространения t_s нормальных волн являются корнями следующего уравнения:

$$F_{12}^{(2)} \left[F_{12}^{(1)} F_1^{(0)} - F_{11}^{(1)} F_2^{(0)} \right] - F_{11}^{(2)} \left[F_{22}^{(1)} F_1^{(0)} - F_{21}^{(1)} F_2^{(0)} \right] = 0 \quad (7)$$

В левой части (7) стоит целая трансцендентная функция комплексного переменного t_s , которая имеет бесконечное множество корней, образующих две ветви – вертикальную, соответствующую дифракционным волнам соскальзывания, и горизонтальную, соответствующую волноводным волнам различного типа.

Основными задачами исследования являлись:

- выяснение закономерностей поведения спектра нормальных волн и изменения характеристик распространения УКВ в зависимости от параметров профиля $N(z)$, длины радиоволны и высоты расположения источника и точки наблюдения;
- изучение возможности появления слабозатухающих нормальных волн в случае приподнятых волноводов, высотной структуры поля этих волн и их влияния на характеристики затухания поля наибольших загоризонтных расстояниях.

Проиллюстрируем результаты численного исследования характеристик распространения УКВ. На рис. 1 приведены результаты расчетов спектра нормальных волн (на рис. 1 слева, корни t_s обозначены звездочками) и дистанционных зависимостей множителя ослабления поля источника над морем (на рис. 1 справа), расположенного на высоте 25 м. Параметры модели тропосферы указаны в подрисуночной подписи. Поляризация поля – вертикальная, длина волны

30 см. Рис. 1 наглядно демонстрирует наличие в спектре горизонтальной и вертикальной ветвей, причем два корня горизонтальной ветви имеют малые мнимые части. Для сравнения на тех же рисунках показаны спектр в случае однородной тропосферы (корни обозначены кружочками) и дистанционная зависимость на высоте 25 м для однородной тропосферы (сплошная кривая). Наличие некоторого излома на кривых рис. 1 объясняется тем, что вертикальная структура поля нормальных волн с наименьшими коэффициентами затухания иная, чем у волноводных мод: их поле в большей степени сосредоточено вблизи верхней границы волновода, что подтверждает исследование высотных множителей, поэтому источник, расположенный существенно ниже, возбуждает эти моды гораздо слабее, вследствие чего их вклад в общее поле становится доминирующим, начиная с расстояний порядка 200 км, на которых другие волноводные моды уже вносят незначительный вклад из-за их затухания.

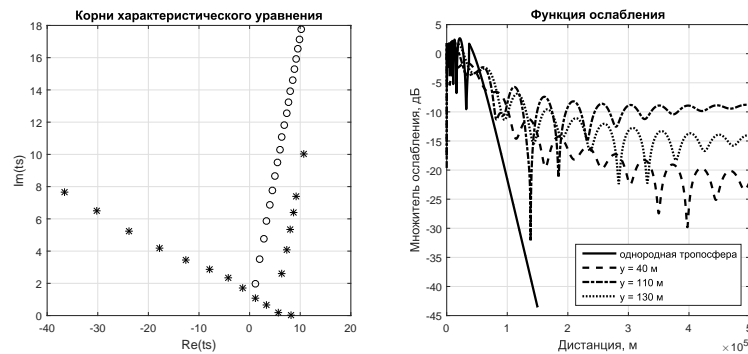


Рис. 1. Корни уравнения (7) и дистанционные зависимости функции ослабления для параметров волновода $N(0) = 320 N\text{-ед.}$, $N(h_1) = 330 N\text{-ед.}$, $N(h_2) = 315 N\text{-ед.}$, $h_1 = 100\text{ м}$, $h_2 = 120\text{ м}$.

На рис. 2 представлены спектр нормальных волн и дистанционные зависимости функции ослабления поля в волноводе с другими параметрами, а на рис. 3 – графики высотных множителей нескольких из них ($t_1 = 10.149 + 0.328 \cdot 10^{-5}i$, $t_8 = -9.827 + 3.789i$, $t_2 = 6.908 + 0.322 \cdot 10^{-2}i$, $t_9 = 6.645 + 4.127i$, моды нумеруются в порядке роста $Im(t_s)$); поляризация поля – вертикальная, длина волны 50 см. Рис. 4 иллюстрирует вертикальную структуру функции ослабления поля на разных расстояниях от источника.

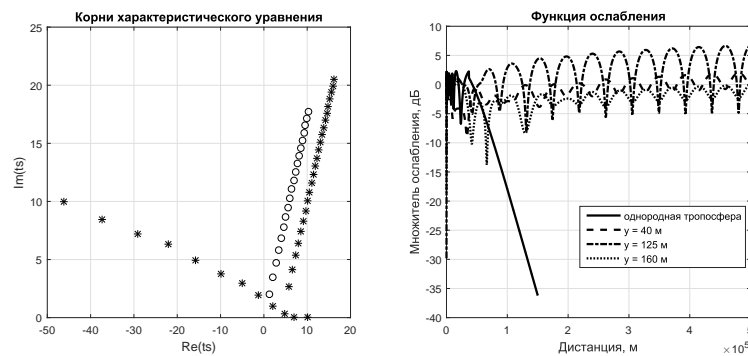


Рис. 2. Корни уравнения (7) и дистанционные зависимости функции ослабления для параметров волновода $N(0) = 315 N\text{-ед.}$, $N(h_1) = 340 N\text{-ед.}$, $N(h_2) = 305 N\text{-ед.}$, $h_1 = 100\text{ м}$, $h_2 = 150\text{ м}$.

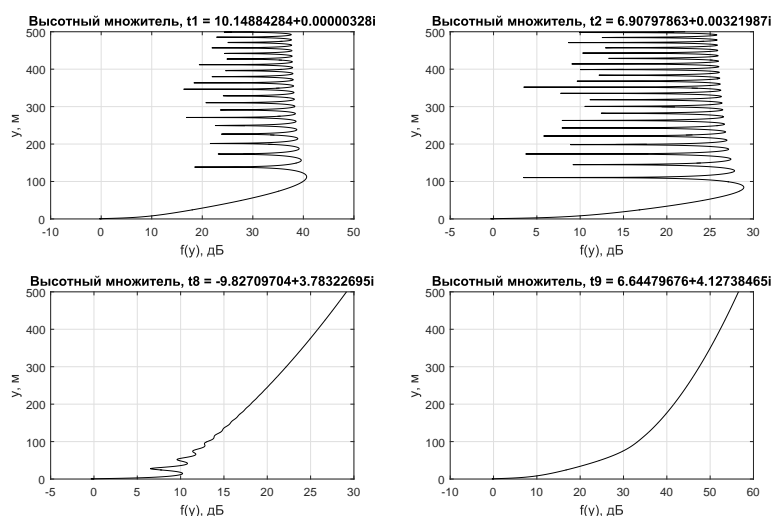


Рис. 3. Графики высотных множителей для различных мод спектра, приведенных на рис. 2.

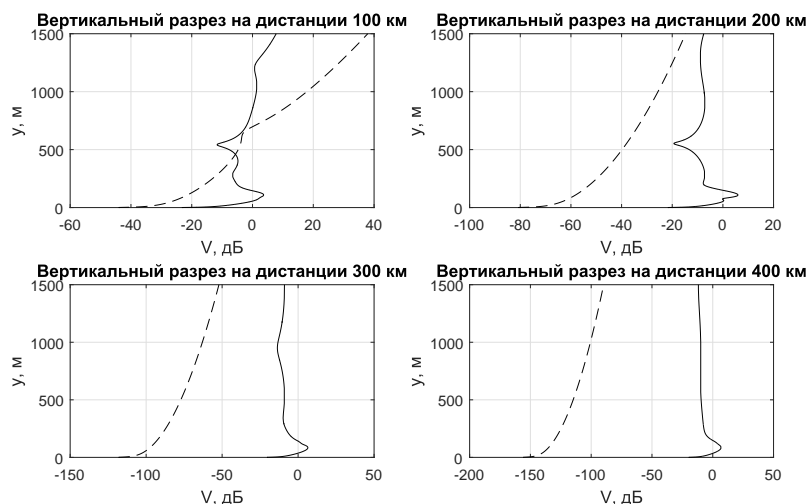


Рис. 4. Вертикальные разрезы функции ослабления на различных расстояниях от источника.

Отмеченные особенности характеристик распространения УКВ в тропосферных волноводах – наличие слабозатухающих модов, поле которых мало на небольших высотах – являются типичными для данной модели профиля $N(z)$. Это представляет интерес с практической точки зрения: поскольку их поле незначительно вблизи морской поверхности, то малы потери энергии из-за поглощения и рассеяния на взволнованной морской поверхности, в отличие от потерь других волноводных мод. Поэтому эти моды могут обеспечить повышенные дальности распространения радиоволн за горизонт. Следует отметить также сложную структуру поля этих мод в зависимости от высоты.

Список литературы

1. Светличный В.А., Смирнова О.В. Исследование характеристик распространения ультракоротких радиоволн в приводном волноводе // Радиотехника и электроника. 2018. Т. 63. № 7. С. 682–690.
2. Baumgartner G.B. A waveguide program for trilinear tropospheric ducts // NCCOSC RDT&E Div. (formerly Naval Ocean Systems Center), San Diego, CA, tech. doc. #610, 1982.
3. Фок В.А. Проблемы дифракции и распространения электромагнитных волн. М.: Советское радио, 1970.