

РАДИОТЕХНИКА, СИСТЕМЫ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ, АНТЕННЫ И УСТРОЙСТВА СВЧ

УДК 621.371

В.А. Алимов¹, В.И. Есипенко², Ю.С. Коробков¹, В.И. Морозов¹

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН НА ТРАССЕ БОЛЬШОЙ ПРОТЯЖЁННОСТИ В ТРОПОСФЕРЕ

Нижегородский научно-исследовательский радиофизический институт (НИРФИ)¹,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева²

Приведены некоторые результаты исследований распространения радиоволн СВЧ диапазона в тропосфере на аэростатной радиотрассе протяжённостью 184 км в Нижегородской области. В ходе эксперимента зарегистрированы быстрые (10–15 %) флуктуации амплитуды принимаемого сигнала, наблюдалась деполяризация радиоизлучения при его распространении в атмосфере Земли. Дана соответствующая физическая интерпретация результатов исследования. Показано, в частности, что заметные амплитудные флуктуации СВЧ сигналов на трассах большой протяжённости могут вызываться турбулентными неоднородностями тропосферы. Вместе с тем, поляризационные эффекты в турбулентной атмосфере даже на таких протяжённых трассах оказываются незначительными. Но отражение радиоволн от сильно шероховатой земной поверхности может вызывать заметную деполяризацию СВЧ-радиоизлучения при распространении его на аэростатной трассе большой протяжённости.

Ключевые слова: тропосфера, распространение радиоволн СВЧ диапазона, аэростатная радиотрасса большой протяжённости, флуктуации амплитуды сигнала, деполяризация радиоизлучения.

Вопросы распространения радиоволн на наземных трассах в пределах прямой видимости и влияние атмосферы Земли на прохождение через неё радиоволн изучались в ряде работ (см., например, [1,2] и цитированную там литературу). Однако при этом соответствующие исследования касались распространения радиоволн сверхвысоких частот в основном на трассах протяжённостью 20–60 км. В то же время особенности распространения радиоволн СВЧ диапазона на трассах большой (до 200 км) протяженности в тропосфере изучались лишь в специфических условиях гористой местности [1, 3, 4]. Применение аэростатов в качестве радиоретрансляторов открывает возможности исследований распространения СВЧ радиоволн на тропосферных трассах большой протяжённости с обычным рельефом земной поверхности. Некоторые результаты соответствующих исследований на одной из таких радиотрасс изложены далее.

Схема эксперимента

Эксперимент по распространению радиоволн в тропосфере проводился на аэростатной радиотрассе протяжённостью 184 км в Горьковской области в дневное время суток. Передатчик, установленный на борту аэростата, излучал монохроматический сигнал. Длина волны излучения составляла 6 см. На борту аэростата применялась слабонаправленная дипольная антенна вертикальной поляризации. Приём осуществлялся в наземном пункте на остронаправленные (коэффициент направленного действия порядка 40 дБ) антенны вертикальной и горизонтальной поляризации, ориентированные на аэростат. Высота подъёма

аэростата над поверхностью Земли составляла $H \sim 2000$ м, так что передатчик находился в пределах прямой видимости приёмника. Принимаемый сигнал контролировался на спектроанализаторе СЧ-60 и регистрировался на бумажной ленте самописца Н-338-1П.

Результаты эксперимента и их интерпретация

В ходе эксперимента устойчиво регистрировалась основная, вертикально поляризованная компонента излучения. Отношение мощностей принимаемого сигнала и собственного шума приёмника соответствовало расчётному значению 25 дБ, характерному для условий распространения сигнала в свободном пространстве на трассе протяжённостью 184 км. Амплитуда сигнала вертикальной поляризации, как правило, испытывала быстрые (10 - 15)% флуктуации. На антенну горизонтальной поляризации принимался быстро флуктуирующий полностью рассеянный (индекс амплитудных флуктуаций практически был равен единице) сигнал с уровнем на 22 дБ ниже уровня сигнала вертикальной поляризации.

Амплитудные флуктуации основного сигнала (сигнала вертикальной поляризации) были, по-видимому, обусловлены влиянием турбулентных неоднородностей приземного слоя (на высотах до $H \sim 1$ км) тропосферы.

Действительно, рассмотрим следующую модельную задачу. Пусть точечный источник, расположенный на расстоянии от плоского слоя с турбулентными неоднородностями, характеризуемыми трёхмерным пространственным спектром диэлектрической проницаемости [2]:

$$\Phi_{\varepsilon}(\chi) = 0.033 C_{\varepsilon}^2 \chi^{-\frac{11}{3}} \exp\left(-\frac{\chi^2}{\chi_m^2}\right) \quad (1)$$

($\chi_m = \frac{5,92}{l_0}$, l_0 – внутренний масштаб турбулентности, C_{ε}^2 – структурная константа) излучает монохроматический сигнал, который принимается на выходе неоднородного слоя толщиной Z .

Относительные флуктуации принимаемого излучения в этом случае описываются следующим выражением [2]:

$$\overline{\left(\frac{\Delta A}{A_0}\right)} \cong 0,14 C_{\varepsilon}^2 k^{\frac{7}{6}} \int_0^z \left[\frac{(z_0 + x)(z - x)}{z} \right]^{\frac{5}{6}} dx. \quad (2)$$

Здесь $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – волновое число.

Интеграл в (2) вычисляется [5] и при $z_0 \cong z$ имеем:

$$\overline{\left(\frac{\Delta A}{A_0}\right)^2} \cong 0,035 \sqrt{\pi} C_{\varepsilon}^2 k^{\frac{7}{6}} z^{\frac{11}{6}} \frac{\Gamma\left(\frac{11}{6}\right)}{\Gamma\left(\frac{7}{3}\right)}, \quad (3)$$

где $\Gamma(\alpha)$ – гамма-функция [5].

Учитывая, что в нашем случае

$$\sqrt{\overline{\left(\frac{\Delta A}{A_0}\right)^2}} \cong 0,1 \div 0,15, \quad k \cong 1 \text{ см}^{-1}, \quad z \cong 10^7 \text{ см},$$

из соотношения (3) получаем $C_{\varepsilon}^2 \cong 5 \cdot 10^{-14} \text{ см}^{\frac{2}{3}}$.

Это значение находится в хорошем соответствии с известными характерными значениями величины C_{ε}^2 для атмосферной турбулентности приземного слоя тропосферы [2].

Обратимся теперь к эффекту деполяризации принимаемого излучения, наблюдавшемуся в нашем эксперименте. Согласно существующим представлениям [2], явление деполя-

ризации СВЧ радиоволн при распространении их в тропосфере Земли пренебрежимо мало. Однако следует заметить, что это утверждение базируется на анализе эффекта деполяризации света турбулентными неоднородностями атмосферы [6,7] и, строго говоря, справедливо лишь для случая, когда основное влияние на деполяризацию излучения оказывают крупномасштабные (в размерах длины волны излучения) неоднородности. Если же последнее условие не выполняется, а в условиях нашего эксперимента длина волны излучения могла быть и больше некоторых характерных размеров турбулентных неоднородностей тропосферы, то необходим более общий подход к решению соответствующей задачи.

Рассмотрим следующую задачу. Слабонаправленный источник, расположенный на расстоянии z_0 от плоского слоя с турбулентными неоднородностями диэлектрической проницаемости $\epsilon_1(x, y, z)$, излучает линейно поляризованную (вдоль оси \vec{x}) волну $\vec{E}_0(E_{0x}, 0, 0)$, а приём ведётся на линейно поляризованную вдоль \vec{y} антенну на выходе неоднородного слоя толщиной Z . Тогда для поля E_y сигнала на выходе приёмной антенны имеем [6, 8]:

$$E_y = \int_0^z \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(\vec{n}_s) e^{ik|\vec{r}-\vec{r}'|} \frac{\partial}{\partial y} \left[E_{0x} \frac{\partial \epsilon_1}{\partial x'} \right] dx' dy' dz', \quad (4)$$

где $\vec{r}(0, 0, z)$ и $\vec{r}'(x', y', z')$ – радиусы-векторы точки наблюдения и точки рассеяния излучения в неоднородном слое соответственно; $f(\vec{n}_s)$ – диаграмма направленности приёмной антенны [8]; $\vec{n}_s = \frac{\vec{r}-\vec{r}'}{|\vec{r}-\vec{r}'|}$ (начало координат расположено на оси \vec{x} в начале неоднородного слоя).

Учтём, что по условиям нашего эксперимента приём излучения ведётся на остронаправленную антенну так, что рассеяние радиоволн происходит в узком конусе с раствором порядка $\frac{\lambda}{d} \ll 1$ (d – характерный масштаб приёмной антенны) и падающая на неоднородный слой волна (при $z_0 \geq z$) является квазиплоской. Проводя необходимые преобразования, во многом аналогичные [6], несложно получить следующее выражение для относительной величины средней интенсивности деполяризованной компоненты электрического поля принимаемого излучения:

$$\frac{E_y^2}{E_{0x}^2} = \frac{\pi^2 z}{8k^2} \int_0^\infty \chi_1^5 \Phi_\epsilon(\chi) d\chi_1, \quad (5)$$

где $\chi = |\vec{\chi}| = \sqrt{\chi_1^2 + \left(\frac{\chi_1^2}{2k} \cdot \frac{z_0}{z+z_0} \right)^2}$ (ср. [6]).

Для случая колмогоровской турбулентности (1) интеграл в соотношении (5) вычисляется. В результате, с учётом [5], имеем:

$$\frac{E_y^2}{E_{0x}^2} = 0.5A\alpha^{-\frac{11}{6}} \left[p^{\frac{1}{3}} \Gamma\left(-\frac{1}{3}\right) {}_2F_2\left(\frac{3}{2}, -\frac{1}{2}; \frac{1}{2}, \frac{4}{3}; p\gamma\right) - 2p^{\frac{5}{6}} z^{\frac{1}{2}} \Gamma\left(-\frac{5}{6}\right) + \right. \\ \left. + 2^{\frac{1}{3}} z^{-\frac{1}{3}} \frac{\Gamma\left(\frac{7}{6}\right) \Gamma\left(\frac{2}{3}\right)}{\Gamma\left(\frac{11}{6}\right)} \cdot {}_2F_2\left(-\frac{5}{6}, -\frac{5}{6}; \frac{2}{3}, \frac{1}{6}; p\gamma\right) \right]. \quad (6)$$

В (6) введены следующие обозначения:

$$A = 0.033 C_\varepsilon^2 \frac{\pi^2 z}{16k^2}; \quad \alpha = \left(\frac{1}{2k} \cdot \frac{z_0}{z + z_0} \right)^2; \quad p = \alpha \chi_m^{-2}; \quad \gamma = (2\alpha)^{-2};$$

${}_2F_2(\alpha_1, \alpha_2; \beta_1, \beta_2; p\gamma)$ – обобщённая гипергеометрическая функция [5].

В предельном случае, когда внутренний масштаб турбулентности во много раз меньше длины волны излучения λ , а точнее параметр

$$p\gamma \cong \left(\frac{l_0}{\lambda} \cdot \frac{z_0}{z + z_0} \right)^2 \ll 1,$$

(в нашем случае $\lambda \cong 6$ см, $l_0 \cong 10^{-1}$ см [2], $z \cong z_0$) из соотношения (6) находим

$$\frac{E_y^2}{E_{ox}^2} \cong 0,033 C_\varepsilon^2 \frac{\pi^2 z}{16k^2} \left[\frac{2k(z + z_0)}{z_0} \right]^{\frac{7}{3}} \frac{\tilde{A}(\frac{7}{6}) \cdot \tilde{A}(\frac{2}{3})}{\tilde{A}(\frac{11}{6})}. \quad (7)$$

Учитывая характерные значения параметров задачи, соответствующие условиям выполнения эксперимента ($C_\varepsilon^2 \approx 5 \cdot 10^{-14}$ (см $^{-\frac{2}{3}}$), $z \approx z_0 \cong 10^7$ (см), $k > 1$ (см $^{-1}$)), из соотношения (7) получаем

$$\frac{E_y^2}{E_{ox}^2} \cong 3,3 \cdot 10^{-7}.$$

Это значение выше характерных значений величины $\frac{E_y^2}{E_{ox}^2}$ для эффектов деполяризации света в турбулентной тропосфере [6,7]. Однако оно заметно ниже величины деполяризации сантиметрового радиоизлучения, наблюдавшейся в нашем эксперименте (см. ранее)

$$\frac{E_y^2}{E_{ox}^2} \cong 7 \cdot 10^{-3}.$$

Объяснение эффекта деполяризации СВЧ-радиоизлучения во время нашего аэростатного эксперимента, по-видимому, состоит в следующем. На радиотрассе была довольно протяжённая возвышенность. Угол скольжения волны, падающей от бортового источника аэростата на эту отражающую земную поверхность, составлял $\theta \approx 5 \cdot 10^{-3}$. Возвышенность была покрыта лесом, так что её можно рассматривать как сильно шероховатую поверхность с крутыми наклонами неровностей (отдельных деревьев). Как известно [9], при отражении от такой поверхности должна наблюдаться практически полная хаотизация и деполяризация падающего излучения. При этом относительная величина мощности диффузной горизонтально поляризованной компоненты сигнала будет равна (с учётом ламбертовского характера рассеяния и экранировки отражённого сигнала при $\theta \ll 1$) [9]:

$$\frac{E_y^2}{E_{ox}^2} \cong \bar{R}^2 \cdot \theta,$$

где \bar{R} – среднее значение коэффициента отражения радиоволн от земной поверхности.

В условиях нашего эксперимента (малые углы ($\theta \ll 1$) скольжения падающего сантиметрового излучения на отражающую поверхность, высокий уровень влажности в приземном слое тропосферы) величина $\bar{R} \cong 1$ [1]. Тогда из последнего соотношения имеем

$$\frac{E_y^2}{E_{ox}^2} \cong 5 \cdot 10^{-3},$$

что находится в хорошем соответствии с измеренным значением интенсивности деполяризованной, горизонтальной компоненты принимаемого сигнала.

Итак, турбулентные неоднородности тропосферы могут вызывать заметные амплитудные флуктуации СВЧ сигналов при распространении их на трассе большой протяжённости. Вместе с тем, поляризационные эффекты в турбулентной тропосфере даже на таких протяжённых радиотрассах незначительны. Однако отражение радиоволн от сильно шероховатой земной поверхности может вызывать заметную деполяризацию СВЧ-радиоизлучения при распространении его на аэростатной радиотрассе большой протяжённости.

Библиографический список

1. **Калинин, А.И.** Распространение радиоволн на трассах наземных и космических радиолиний / А.И. Калинин. – М.: Связь, 1979.
2. Прохождение радиоволн через атмосферу Земли / Ю.А. Кравцов [и др.]. – М.: Радио и связь, 1983.
3. **Троицкий, В.Н.** Распространение ультракоротких волн в горах / В.Н. Троицкий. – М.: Связь, 1968.
4. **Алимов, В.А.** // Радиотехника. 1987. № 10. С. 49.
5. Интегралы и ряды. Элементарные функции / А.П. Прудников [и др.]. – М.: Наука, 1981.
6. **Татарский, В.И.** // Известия вузов. Радиофизика. 1967. Т.10, Л 12. С. 1762.
7. **Кравцов, Ю.А.** // Известия вузов. Радиофизика. 1970. Т. 13, Л 2. С. 281.
8. **Рытов, С.М.** Введение в статистическую радиофизику. Ч. II / С.М. Рытов, Ю.А. Кравцов, В.И. Татарский. – М.: Наука, 1978.
9. **Басс, Ф.Г.** Рассеяние волн на статистически неровной поверхности / Ф.Г. Басс, И.М. Фукс. – М.: Наука, 1972.

*Дата поступления
в редакцию 03.10.2014*

V.A. Alimov, V.I. Esipenko, U.S. Korobkov, V.I. Morozov

SOME RESULTS OF RESEARCH OF RADIO-WAVE PROPAGATION ON THE ROAD A LARGE EXTENT IN THE TROPOSPHERE

Nizhny Novgorod research Institute of Radiophysics,
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

Purpose: Results of research on the propagation of microwave range in the troposphere on the balloon radiotrance length of 184 km.

Desing/methodology/approach: Experimental results on the detection of fast fluctuations of signal amplitude are re-dused.

Findings: Given the physical interpretation of the study results. It is shown that significant fluctuations in amplitude may be caused by turbulent inhomogeneities in the troposphere.

Research limitations/implications: The reflection of radio waves from very rough earth surface can cause significant depolarization of microwave radiation on the slopes of great extent.

Originality/value: Polarization effects in turbulent troposphere on the slopes of the large extent be insignificant.

Key words: troposphere, results, spreading microwave frequency range, radio wave, troposphere balloon radio route, fast amplitude fluctuation, visible depolarization.