

УДК 621.396.946

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-1-89-102>

EDN OVSTWY



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Моделирование цифровой пространственной обработки в условиях тропосферного распространения сантиметровых радиоволн для задач телекоммуникации

И.В. Пешков ^{1, @},
Д.Н. Борисов ²

¹ Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина, Елец, 399770 Россия

² Воронежский государственный университет, Воронеж, 394018 Россия

@ Автор для переписки, e-mail: ilvpeshkov@gmail.com

Резюме

Цели. Прохождение радиолуча в слоях атмосферы зависит от показателя преломления и характера его вертикального изменения. В связи с этим могут возникнуть условия, когда радиолучи на малых высотах будут распространяться волноводным образом. При этом происходит затухание сигнала с отличающимися угловыми координатами по углу места. Целью работы является исследование на основе моделирования алгоритмов работы цифровых антенных решеток (ЦАР) для повышения дальности и надежности радиосвязи в условиях тропосферного волновода. Основными преимуществами ЦАР являются высокий коэффициент усиления и управляемость формы диаграммы направленности. При этом необходимо воспользоваться методами моделирования распространения луча в слоях тропосферы для оценки работы алгоритмов оценки угловых координат со сверхразрешением с последующим диаграммообразованием.

Методы. В работе используется аппарат параболических уравнений для оценки коэффициента затуханий радиоволн сантиметрового диапазона, а также алгоритм трассировки лучей через тропосферный волновод для оценки фаз в раскрыве антенн ЦАР. В этом случае будет достоверно сформирована пространственная корреляционная матрица, являющаяся основой для вычисления координат со сверхразрешением (метод MUSIC) и вектора весовых коэффициентов (алгоритм максимизации отношения сигнал/помеха + шум).

Результаты. Рассмотрены типичные случаи возникновения тропосферного волновода на основе модифицированного показателя преломления. Получены графики вероятности битовых ошибок после прохождения сигнала по тропосферному волноводу при разной геометрии антенных решеток. Рассмотрены кольцевые и сферические решетки из направленных антенных элементов.

Выводы. Проведенные численные исследования позволяют сделать вывод, что дальность связи в диапазоне сантиметровых волн увеличивается с помощью ЦАР. Кроме того, установлено, что кольцевая антенная решетка позволяет получить самые низкие значения вероятности битовой ошибки при приеме дискретных радиосигналов в тропосферном волноводе.

Ключевые слова: цифровые антенные решетки, пеленгация, MUSIC, диаграммообразование, тропосферная связь, моделирование

• Поступила: 09.10.2023 • Доработана: 22.07.2024 • Принята к опубликованию: 10.12.2024

Для цитирования: Пешков И.В., Борисов Д.Н. Моделирование цифровой пространственной обработки в условиях тропосферного распространения сантиметровых радиоволн для задач телекоммуникации. *Russian Technological Journal*. 2025;13(1):89–102. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-1-89-102>, <https://elibrary.ru/OVSTWY>

Прозрачность финансовой деятельности: Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Modeling of digital spatial processing under conditions of troposphere propagation of centimeter radio waves for wireless telecommunication

Ilya W. Peshkov ^{1, @},
Dmitry N. Borisov ²

¹ Bunin Yelets State University, Yelets, 399770 Russia

² Voronezh State University, Voronezh, 394018 Russia

@ Corresponding author, e-mail: ilvpeshkov@gmail.com

Abstract

Objectives. A radio beam traveling through the layers of the atmosphere depends on the refractive index and its vertical variation. In this regard, attenuation may occur when radio rays propagate in a waveguide manner at low altitudes. A multipath fading effect may also occur when several rays reflected from different layers of the troposphere and having different spatial coordinates in elevation arrive at the receiver. The aim of the study is to simulate the operational algorithms of digital antenna arrays (DAA) in order to increase the range and reliability of radio communication using a tropospheric waveguide. The main advantage of the DAA consists in the high gain and controllability of the pattern shape. In order to evaluate algorithms for direction-of-arrival estimation with super-resolution and beamforming, it is necessary to select an appropriate method for modeling beam propagation in the layers of the troposphere. It is proposed to use DAA to increase the range and reliability of radio communications using a tropospheric waveguide. The performance of algorithms for direction-of-arrival estimation and beamforming in the troposphere can be evaluated using ray tracing simulation.

Methods. Parabolic equations are used to estimate the path losses of radio waves in the centimeter range. A ray tracing algorithm referring to a tropospheric waveguide is used to estimate the phases in the aperture of the receiving array. A spatial correlation matrix is reliably generated to form the basis for calculating coordinates using a super-resolution multiple signal classification (MUSIC) method and the weighting factor vector (algorithm for maximizing the signal-to-noise + noise ratio).

Results. Typical cases of a tropospheric waveguide based on a modified refractive index were considered. The bit error rate curves are obtained as a function of the geometry of the antenna arrays after the signal has passed through the tropospheric waveguide. Circular and spherical antenna arrays composed of directional antenna elements are considered.

Conclusions. Numerical studies suggest that the range of communication links using digital antenna arrays increases in the centimeter band. The best geometry for this purpose is circular, since providing the lowest bit error rate for binary phase-shift keyed signals.

Keywords: digital antenna array, direction-of-arrival estimation, MUSIC method, beamforming, tropospheric waveguide, simulation

• Submitted: 09.10.2023 • Revised: 22.07.2024 • Accepted: 10.12.2024

For citation: Peshkov I.W., Borisov D.N. Modeling of digital spatial processing under conditions of troposphere propagation of centimeter radio waves for wireless telecommunication. *Russian Technological Journal*. 2025;13(1):89–102. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-1-89-102>, <https://elibrary.ru/OVSTWY>

Financial disclosure: The authors have no financial or proprietary interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Распространение радиоволн ультракоротковолнового диапазона в атмосфере осуществляется, как правило, не прямолинейно, а обычно изогнуто таким образом, что радиоволна может испытывать рефракцию в нижних слоях и/или многократные отражения от земной поверхности [1]. В этом случае сигналы сантиметровых длин волн могут достигать приемных терминалов за несколько сотен километров от передатчика [2–4]. Данный эффект возникает по причине разницы температур, влажности, давления в слоях тропосферы, за что получил наименование «тропосферный волновод» [5–7]. Такой вид связи на дальние расстояния может быть перспективным, т.к. при нем не задействуются дорогостоящие средства, как например, спутники [8]. Однако надежность и устойчивость связи определяются степенью затухания, корректностью определения высоты тропосферного волновода в зависимости от дальности до приемника и т.д. [9]. В связи с этим возникает необходимость исследования применения антенных решеток с цифровым управлением луча в условиях тропосферного волновода как средства для преодоления обозначенных проблем связи. Такие устройства позволяют цифровым способом формировать максимум и нули диаграммы направленности в нужных направлениях.

В работе предлагается комбинированный способ моделирования, основанный на поэтапном определении величины потерь, а также фаз лучей сантиметрового диапазона в слоях атмосферы в зависимости от показателя рефракции на различной высоте. Кроме того, для организации такого рода связи исследуется возможность использования цифровых антенных решеток (ЦАР). На начальном этапе моделирования осуществляется оценка затухания радиосигнала, затем – вычисление пути распространения с помощью алгоритма трассировки лучей от передатчика на приемную ЦАР, и на последнем этапе – моделирование алгоритмов диаграммообразования (оценка угловых координат всех лучей, а также цифровое формирование диаграммы направленности) с вычислением вероятности битовой ошибки.

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЛУЧА В ТРОПОСФЕРЕ

Известно, что путь распространения одиночного луча определяется известным законом Снеллиуса для сплошной сферически-слоистой среды¹:

$$n(h)(R_E + h)\cos e = \text{const}, \quad (1)$$

где n – показатель преломления среды, h – высота над поверхностью Земли, R_E – радиус Земли. Рассмотрим механизм образования тропосферного распространения более подробно, e – угол места луча.

Действительная часть показателя преломления может быть выражена как функция атмосферного давления, влажности и температуры воздуха. Формула для показателя является полуэмпирической и записывается как²:

$$n = 1 + 77.6 \cdot 10^{-6} \frac{P}{T} + 0.373 \frac{p}{T^2}, \quad (2)$$

где P – атмосферное давление в миллибарах, T – температура в градусах Кельвина и p – давление водяного пара в миллибарах. Уравнение (2) известно как формула Дебая, и было показано, что оно обладает погрешностью $\pm 0.5\%$ [10]. Показатель преломления n редко превышает величину 1.0004 на поверхности, и вводят так называемую рефракцию радиоволн³ N , определяемую как:

$$N = (n - 1) \cdot 10^6. \quad (3)$$

Распространение радиоволн больше зависит от градиентов рефракции, чем от самого значения N [10].

¹ Рекомендация МСЭ-R P.834-6. Влияние тропосферной рефракции на распространение радиоволн. [Recommendation ITU-R P.834-6. *Effects of tropospheric refraction on radiowave propagation* (in Russ.).]

² Справочник по радиометеорологии. ITU, 2014. https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/hdb/R-HDB-26-2013-OAS-PDF-R.pdf. Дата обращения 09.10.2023. [The Handbook on Radiometeorology. ITU, 2014. https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/hdb/R-HDB-26-2013-OAS-PDF-R.pdf. Accessed October 09, 2023.]

³ Рекомендация МСЭ-R P.453-12(09/2016). Индекс рефракции радиоволн: его формула и данные о рефракции. [Recommendation ITU-R P.453-12(09/2016). *Radio wave refraction index: its formula and refraction data* (in Russ.).]

Как правило, заметные градиенты рефракции в горизонтальном направлении возникают в гораздо больших масштабах (десятки метров – десятки километров), чем в вертикальном (десятки метров – сотни метров). Поэтому часто предполагается, что атмосфера имеет горизонтальную стратификацию, и в дальнейшем рассматривается только высотная зависимость рефракции, пренебрегая любыми горизонтальными вариациями.

Таким же образом, чтобы включить кривизну Земли, определяется модифицированная или измененная рефракция M из модифицированного или измененного показателя преломления m [11]:

$$M = (m - 1) \cdot 10^6 = 10^6 \left(n - 1 + \frac{h}{R_E} \right) = N + 10^6 \cdot \frac{h}{R_E}. \quad (4)$$

Наземные и приподнятые волноводы моделируются трехлинейной кривой, называемой профилем, как на рис. 1. Случай на рис. 1а иллюстрирует структуру простого поверхностного канала. Здесь волновод простирается от определенной граничной высоты к поверхности Земли, а слой захвата, где справедливо условие $dM/dh < 0$, способствующее возникновению рефракции волн, тянется вдоль всего пути распространения волн. На рис. 1б показан поверхностный S-образный канал, который доходит до поверхности Земли, а слой захвата – не доходит, поскольку условие $dM/dh > 0$ справедливо возле поверхности. В этих двух случаях глубина канала представляет собой разницу высот между поверхностью Земли и верхней частью канала, где достигается минимум измененного профиля рефракции⁴. На рис. 1в приведены общие условия для приподнятого канала, когда значение M на поверхности Земли меньше, чем в верхней части канала, и поэтому канал не может достигать поверхности.

Как упоминалось выше, появление волновода является результатом сильных вертикальных изменений показателя преломления атмосферы между воздушными массами различной температуры и влажности, особенно на низких уровнях атмосферы. Таким образом, тропосферный волновод позволяет электромагнитной энергии распространяться на большие расстояния, обеспечивая загоризонтную дальнюю радиосвязь.

⁴ Lindquist T. *Wave Propagation Models in the Troposphere for Long-Range UHF/SHF Radio Connections*. PhD Thesis. 2020. <https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:kau:diva-80679>. Дата обращения 09.10.2023. / Accessed October 09, 2023.

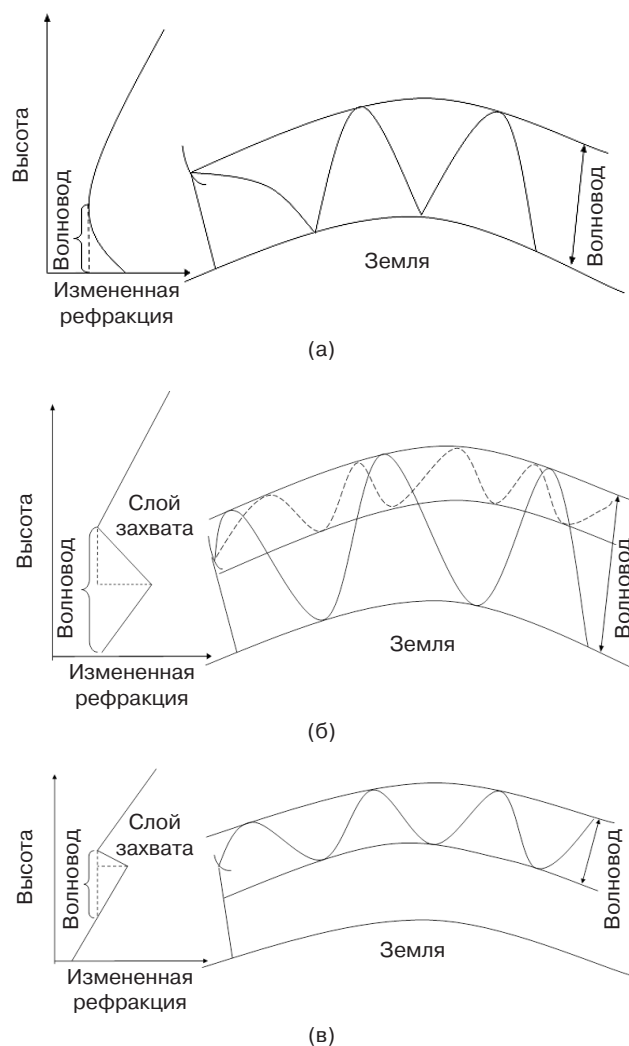


Рис. 1. M -профиль для различных типов проводимости: (а) простой поверхностный (приземный) волновод, (б) поверхностный волновод, (в) приподнятый волновод

ВЫЧИСЛЕНИЕ ОСЛАБЛЕНИЯ РАДИОСИГНАЛОВ МЕТОДОМ ПАРАБОЛИЧЕСКОГО УРАВНЕНИЯ

В данном разделе приводится описание аппарата параболического уравнения (ПУ) для задач тропосферного распространения радиоволн для оценки степени их затухания. Оно было введено Леонтовичем и Фоком в 1946 г. [12] и с тех пор постепенно совершенствовалось.

Из уравнения Гельмгольца компонент φ электрического или магнитного поля удовлетворяет условию [13]:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} + k^2 n^2 \varphi = 0, \quad (5)$$

где k – волновое число свободного пространства, а φ – компонент электромагнитного поля либо E_y ,

либо H_u для горизонтальной и вертикальной поляризации соответственно. Введем так называемую редуцированную функцию поля $u(x, z)$ в зависимости от координат x и z :

$$\dot{u}(x, z) = e^{-ikx} \varphi(x, z). \quad (6)$$

Смысл выполнения этой замены и решения для $\dot{u}(x, z)$ вместо $\varphi(x, z)$ заключается в том, что $\dot{u}(x, z)$ будет медленно меняться в зависимости от направления распространения. После этой замены скалярное волновое уравнение (5) примет вид:

$$\left\{ \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} + 2ik \frac{\partial}{\partial x} + k^2 [n^2 - 1] \right\} \dot{u}(x, z) = 0. \quad (7)$$

Это уравнение по-прежнему классифицируется как эллиптическое, а не как параболическое. Принято вводить псевдодифференциальный оператор

$$Q = \sqrt{\frac{1}{k^2} \frac{\partial^2}{\partial z^2} + n^2} = \sqrt{1 + q}, \quad q = \frac{1}{k^2} \frac{\partial^2}{\partial z^2} + (n(x, z) - 1)$$

и факторизовать уравнение (7). Благодаря этой замене вывод становится более общим [14]:

$$\left\{ \frac{\partial}{\partial x} + ik(1 - Q) \right\} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} + ik(1 + Q) \right\} u = 0. \quad (8)$$

Если начальное приведенное поле $u(0, z)$ известно, уравнение (9) просто повторяется с шагом Δx , пока не будет достигнута целевая точка с координатами x, z [12, 13]:

$$u(x + \Delta x, z) = e^{ik\Delta x(Q-1)} u(x, z). \quad (9)$$

Существуют различные методы решения уравнения (9) [14]. Наиболее распространенными, встречающимися в существующей литературе, являются методы ПУ с разделенным шагом преобразования Фурье, методы конечных элементов и методы конечных разностей⁵.

После вычисления напряженности поля согласно (9) необходима оценка степени затухания на трассе, для чего используются коэффициенты распространения и потерь. Коэффициент распространения (propagation factor) PF (дБ) определяется как квадрат отношения амплитуды электрического поля в данной точке при определенных условиях к амплитуде электрического поля, полученной в той же точке в условиях свободного распространения. Уравнение (10) дает выражение коэффициента распространения через поле $|\dot{u}(x, z)|$ относительно свободного

пространства, а также показывает связь с величиной потерь на трассе (propagation loss) PL (дБ) [15–17]:

$$PF = 20 \lg |\dot{u}(x, z)| + 10 \lg(r) + 10 \lg(\lambda), \quad (10)$$

$$PL = 20 \lg \left(\frac{4\pi r}{\lambda} \right) - PF, \quad (11)$$

где λ – длина волны, r – дальность распространения радиоволн.

МЕТОД ТРАССИРОВКИ ЛУЧЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОБЫКНОВЕННОГО ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ 2-ГО ПОРЯДКА

В данном разделе описывается алгоритм трассировки лучей в слоях тропосферы для вычисления числа лучей, а также их азимутальных и угломестных координат в раскрые антенной решетки с последующей цифровой обработкой. Запишем закон Снеллиуса (1), положив h как функцию r , т.е.

$$n[h(r)] [R_E + h(r)] \cos e = \text{const}. \quad (12)$$

Из геометрического представления величин (рис. 2) можно получить для бесконечно малого dh и dr [18]:

$$\sin e = \frac{dh}{dr}, \quad (13)$$

$$\cos e = \sqrt{1 - \left(\frac{dh}{dr} \right)^2} \left(\geq 0, \text{ т.е. } e \in \left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2} \right] \right). \quad (14)$$

Тогда

$$nh(r) [R_E + h(r)] \sqrt{1 - \left(\frac{dh}{dr} \right)^2} = \text{const}. \quad (15)$$

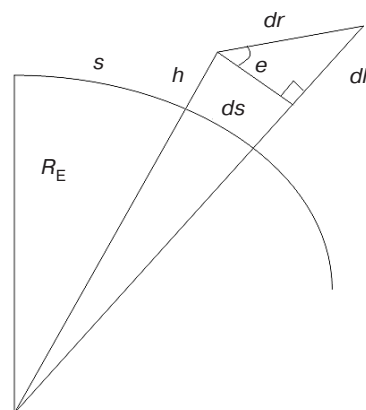


Рис. 2. Геометрическое представление величин R_E , h , s и их дифференциалов

⁵ Ehn J. *Propagation of Radio Waves in a Realistic Environment using a Parabolic Equation Approach*. PhD Thesis. 2019. <https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:liu:diva-157610>. Дата обращения 09.10.2023. / Accessed October 09, 2023.

Из предположения, что h является функцией r , следует, что показатель преломления n неявно зависит от r . Продифференцируем уравнение (15) по r и получим:

$$\frac{dn}{dh} \frac{dh}{dr} (R_E + h) \sqrt{1 - \left(\frac{dh}{dr}\right)^2} + n \frac{dh}{dr} \sqrt{1 - \left(\frac{dh}{dr}\right)^2} + \frac{-2 \frac{dh}{dr} \frac{d^2 h}{dr^2}}{2 \sqrt{1 - \left(\frac{dh}{dr}\right)^2}} = 0. \quad (16)$$

После несложных преобразований и введя замену $\frac{dh}{dr} = u$, получим эквивалентную систему двух связанных уравнений 1-го порядка [18]:

$$\frac{dh}{dr} = u, \quad (17)$$

$$\frac{du}{dr} = -u^2 \left(\frac{1}{n} \frac{dn}{dh} + \frac{1}{R_E + h} \right) + \left(\frac{1}{n} \frac{dn}{dh} + \frac{1}{R_E + h} \right). \quad (18)$$

Уравнения (17)–(18) можно рассматривать как задачу с начальными значениями:

$$u(r=0) = \left. \frac{dh}{dr} \right|_{r=0} = \sin e_0, \quad (19)$$

$$h(r=0) = h_0, \quad (20)$$

и проблема трассировки лучей однозначно решается этим обыкновенным дифференциальным уравнением.

Уравнения (17)–(18) дискретизируются и решаются по шагам Δr . Значение шага итерации от $(l-1)$ до l выполняется следующим образом [18].

Шаг 1. Оценить величины $\frac{1}{n_{l-1}}$ и $\left. \frac{dn}{dh} \right|_{l-1}$ на высоте h_{l-1} с использованием экспериментальных данных или приближенных значений.

Шаг 2. Решить уравнения (17)–(18) с начальными значениями u_{l-1} и h_{l-1} , чтобы получить величины u_l и h_l .

Шаг 3. Рассчитать s_l – расстояние распространения луча на шаге l :

$$s_l = s_{l-1} + R_E \arcsin \left(\frac{\cos e_{l-1} \Delta r}{R_E + h_l} \right), \quad (21)$$

а также угол

$$e_l = \arcsin(u_{l-1}). \quad (22)$$

Шаги 1–3 повторяются от $l=1$ до $l=L$, т.е. соответствующей конечной точке расчета путей распространения лучей. Численное дифференцирование на шаге 2 реализуется с использованием метода Рунге – Кутты 4-го порядка. Для первой итерации $l=1$ начальные значения на шаге 2 задаются с помощью уравнений (19)–(20), а показатель преломления и его производная должны быть оценены на высоте h_0 , на которой располагается передающая антенна, в результате чего можно получить величины $\frac{1}{n_0}$

и $\left. \frac{dn}{dh} \right|_0$ соответственно. Таким образом, расстояние от точки передатчика до ЦАР делится на L точек. В каждой точке l итерации вычисляются значения s_l , e_l , n_l и h_l каждого луча.

МОДЕЛИРОВАНИЕ

В теоретической части статьи были представлены методы расчета распространения электромагнитных лучей в стратифицированной атмосфере. Полученные таким образом радиосигналы $\vec{q}$ суммируются в раскрые ЦАР для последующей пространственной фильтрации, схема которой показана на рис. 3 [19].

Пусть имеется антенная решетка, состоящая из K направленных антенных элементов (АЭ).

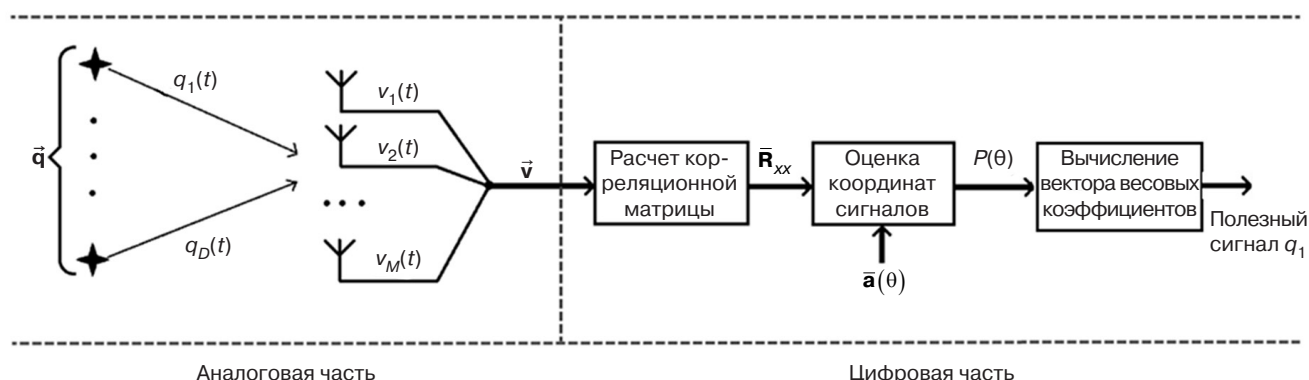


Рис. 3. Схема обработки сигналов в ЦАР

Она принимает D независимых сигналов с разных направлений с координатой по азимуту θ_D и углу места ϕ_D , как показано на рис. 3. Здесь $q_D(t)$ – падающий сигнал, $v_K(t)$ – принятый сигнал с K -го АЭ в дискретный момент времени t . Здесь и далее индекс «1» обозначает полезный сигнал. В итоге матрица выходного сигнала ЦАР имеет следующий вид:

$$\vec{v} = \mathbf{A}\vec{q} + \vec{n}, \quad (23)$$

где $\vec{n}$ – вектор шума; $\mathbf{A}$ – матрица сканирующих векторов $\vec{a}(\theta, \phi)$, которые определяют амплитудно-фазовое распределение поля антенной решетки. Таким образом:

$$\mathbf{A} = [\vec{a}(\theta_1, \phi_1) \ \vec{a}(\theta_2, \phi_2) \ \dots \ \vec{a}(\theta_D, \phi_D)], \quad (24)$$

$$\vec{a}(\theta, \phi) = \begin{bmatrix} g_1(\theta, \phi)e^{j\mathbf{k}\mathbf{r}_1^T} & g_2(\theta, \phi)e^{j\mathbf{k}\mathbf{r}_2^T} & \dots & g_K(\theta, \phi)e^{j\mathbf{k}\mathbf{r}_K^T} \end{bmatrix}, \quad (25)$$

где $\mathbf{k} = \frac{2\pi}{\lambda}(k_x, k_y, k_z) = \frac{2\pi}{\lambda}(\sin\phi\cos\theta, \sin\phi\sin\theta, \cos\phi)$ – волновой вектор, $\mathbf{r}_n^T = (x_n, y_n, z_n)^T$ – радиус-вектор к n -му АЭ, $g_n(\theta, \phi)$ – диаграмма направленности n -го АЭ.

Пространственная корреляционная матрица сигналов определяется по формуле:

$$\hat{\mathbf{R}} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \vec{v}(t)\vec{v}^H(t), \quad (26)$$

где T – число отсчетов цифрового сигнала, индекс H показывает эрмитово транспонирование вектора $\vec{v}(t)$.

Далее угловые координаты сигналов определяются по методу MUSIC⁶, который относится к собственно структурным и преодолевает разрешение по критерию Релея, т.е. его разрешающая способность меньше ширины главного лепестка диаграммы направленности решетки [20]:

$$P_{\text{MU}}(\theta) = \frac{1}{|\vec{a}^H(\theta)\mathbf{E}_{\text{noise}}\mathbf{E}_{\text{noise}}^H\vec{a}(\theta)|}, \quad (27)$$

где $\mathbf{E}_{\text{noise}}$ – собственный вектор шумов.

⁶ Multiple signal classification – алгоритм, используемый для оценивания частот суммы синусоид на фоне шумов по серии измерений и определения угловых координат множества источников сигналов в цифровых антенных решетках. [Multiple signal classification is an algorithm for estimating sinusoidal sum frequencies against noise from a series of measurements and for determining angular coordinates of multiple signal sources in digital antenna arrays.]

Вектор весовых коэффициентов для формирования диаграммы направленности ЦАР рассчитывается как [21]:

$$\vec{w} = \frac{\mathbf{R}^{-1}\vec{a}(\theta_1, \phi_1)}{\vec{a}(\theta_1, \phi_1)^H \mathbf{R}^{-1}\vec{a}(\theta_1, \phi_1)}. \quad (28)$$

Таким образом, ЦАР определяет пространственные координаты сигнала, согласно (26), (27) и затем формирует в цифровой области диаграмму направленности, исходя из полученного вектора $\vec{w}$. Тогда сигнал на выходе должен выглядеть следующим образом:

$$q_1 = \vec{w}\vec{v}. \quad (29)$$

На основе моделирования проведено исследование по оценке дальности распространения телекоммуникационных сигналов в слоях тропосферы. Для всех случаев максимальная дальность выбрана равной 150 км с разрешением Δr , равным 500 м. Очевидно, что для того, чтобы отследить все лучи от передатчика, прибывающие на приемную ЦАР, потребуется провести трассировку во всем диапазоне углов склонения. Однако известно выражение, показывающее предельные значения по углу места, в пределах которых происходит распространение радиоволны внутри воздушного тропосферного волновода [22]:

$$\Phi_{\min, \max} = \pm \sqrt{2 \left(\frac{1}{n(0)} \frac{dn}{dh} - \frac{1}{R_0} \right) (h_t - \delta)}, \quad (30)$$

где δ – толщина слоя захвата, h_t – высота передающей антенны.

Обобщенная схема имитационного моделирования показана на рис. 4. Антенна передатчика в экспериментах устанавливалась на высоту 200 м в условиях действия шума и многолучевого распространения. Использовался сигнал с бинарной фазовой манипуляцией со скоростью 1 Мбит/с. Мощность передатчика составляла 10 Вт, мощность шума в диапазоне ультракоротких волн – $1.7 \cdot 10^{-13}$ Вт [23]. Оценивалась вероятность битовой ошибки как отношение количества ошибочно принятых бит к общему их числу.



Рис. 4. Обобщенная схема имитационного моделирования

Эксперимент 1. Идеализированный поверхностный тропосферный волновод

В данном эксперименте моделировался поверхностный волновод. Модифицированный профиль рефракции показан на рис. 5. Он имеет отрицательный наклон по уровню -100 М-ед. км $^{-1}$ в диапазоне высот от 0 до 350 м и наклон 117 М-ед. км $^{-1}$.

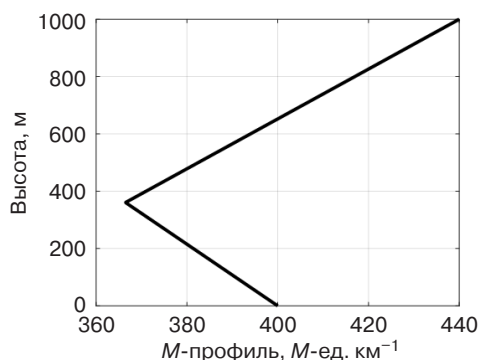


Рис. 5. Модифицированный М-профиль поверхностного волновода

На рис. 6 показано распределение электромагнитного поля в зависимости от расстояния от передатчика и высоты над поверхностью Земли. Вычисление осуществлено согласно аппарату ПУ и численному алгоритму расщепления Фурье. Частота несущей составляет 5 ГГц, в качестве антенны передатчика служит полуволновый диполь.

Из рис. 6 видно, что распределение поля носит неравномерный характер.

На рис. 7 показаны лучи для рассматриваемого профиля рефракции.

Видно, что лучи отражаются от верхней границы слоя захвата, после чего достигают поверхности

Земли, от которого снова происходит отражение. Такой процесс продолжается до приемной ЦАР с затуханием, как показано на рис. 6. На рис. 8 показан один из таких лучей, который пересекает приемную ЦАР.

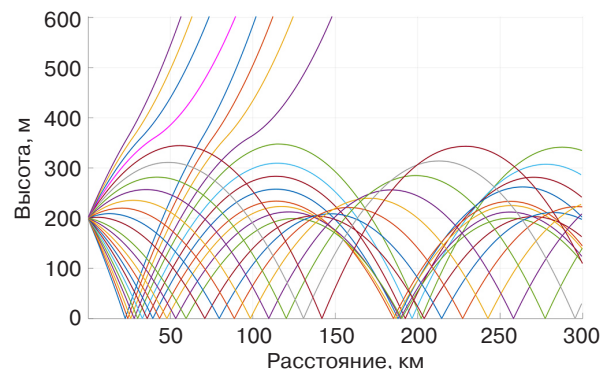


Рис. 7. Лучи, распространяющиеся в нижних слоях тропосферного волновода

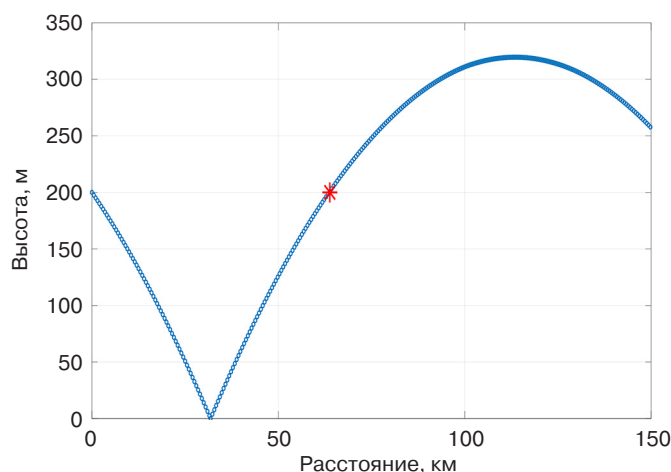
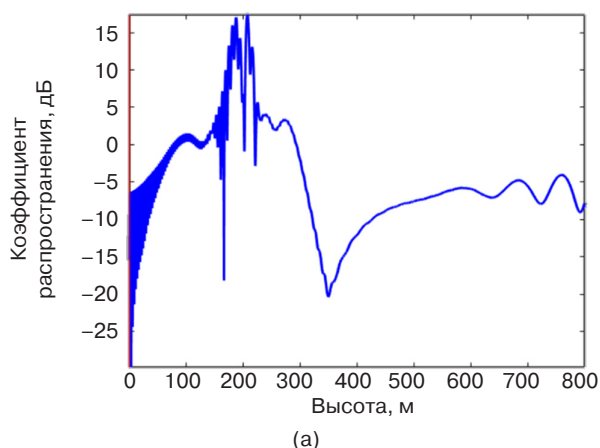
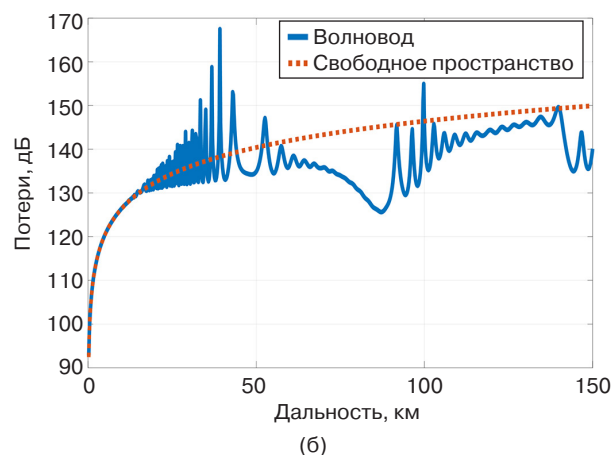


Рис. 8. Пример пересечения луча (синяя линия) и ЦАР (красная звездочка)



(а)



(б)

Рис. 6. Параметры распределения поля:

(а) коэффициент распространения для вертикального среза в точке 25 км,
(б) потери в горизонтальном срезе по уровню 200 м (синяя линия – в атмосфере, представленной на рис. 5; оранжевая пунктирная линия – в свободном пространстве)

На рис. 9 показан график вероятности битовой ошибки в зависимости от типа антенной решетки и расстояния, в пределах которого может быть осуществлен прием (на расстоянии от 50 до 100 км до передатчика). При этом затухание радиосигнала составляло около -135 дБ. Использовались кольцевая и полусферная геометрия приемных ЦАР с направленными АЭ [23].

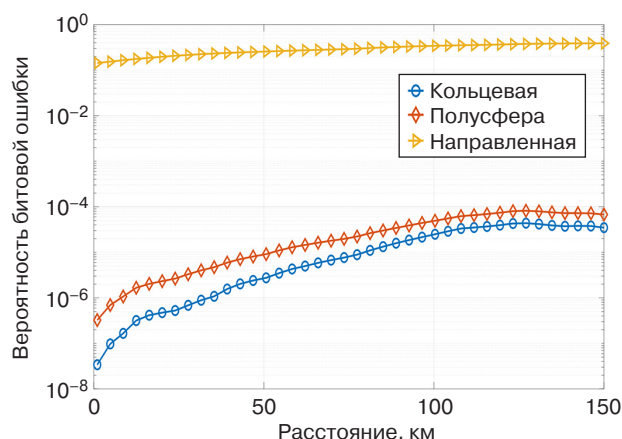


Рис. 9. Зависимость вероятности битовой ошибки от расстояния

Из графиков на рис. 9 видно, что кольцевая ЦАР обеспечивает самую низкую вероятность ошибки (до 10^{-6}) на дистанции до 50 км. Если используется полусферическая форма приемной ЦАР и направленная антенна, то величина вероятности битовой ошибки на этой дистанции составляет примерно 10^{-5} и 0.3 соответственно, что согласуется с ранее полученными результатами [19]. В этом случае после прохождения атмосферы затухание сигнала составляет около 135 дБ, как видно из рис. 6, и тогда отношение мощности сигнала к мощности шума на выходе каждого приемного АЭ составляет 10 дБ. При этом на рис. 9 и далее не наблюдается явной

зависимости битовой ошибки от расстояния, особенно начиная со значения 15 км. Объясняется это тем, что, как видно из формулы (11), величина потерь по мощности линейно зависит от пройденного радиоволной пути, тогда как напряженность поля обратно пропорциональна величине $\sqrt{r}$.

Эксперимент 2. Идеализированный тропосферный S-образный волновод

Рассмотрим идеализированную поверхность S-образного канала, характеризующуюся профилями M и N , показанными на рис. 10. Профиль M начинается с наклона 117 M -ед. км^{-1} для самых низких 100 м, а затем изменяется на $-100 M$ -ед. км^{-1} до высоты 400 м, после чего возвращается к значению 117 M -ед. км^{-1} .

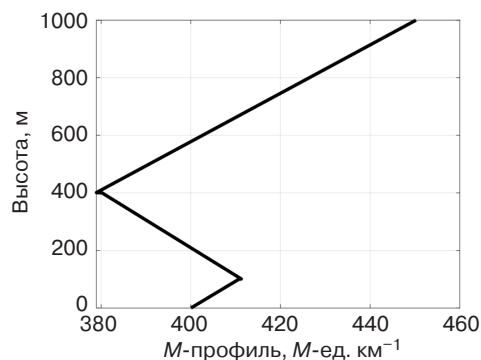


Рис. 10. Модифицированный M -профиль слоев атмосферы

На рис. 11 показаны параметры распределения электромагнитного поля в соответствии с профилем модифицированного показателя рефракции, изображенным на рис. 10.

Из рис. 11а видно, что коэффициент распространения на 15 дБ больше на высоте передатчика 200 м

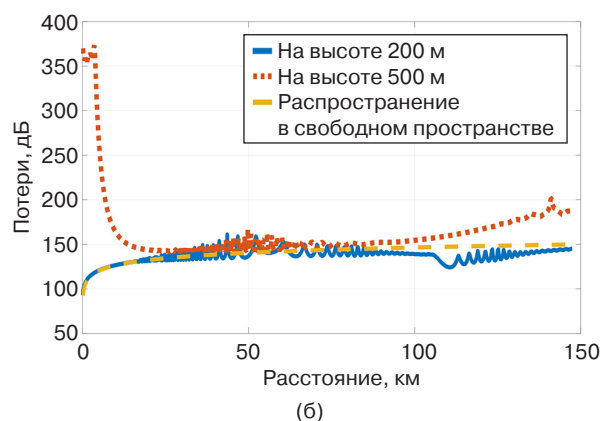
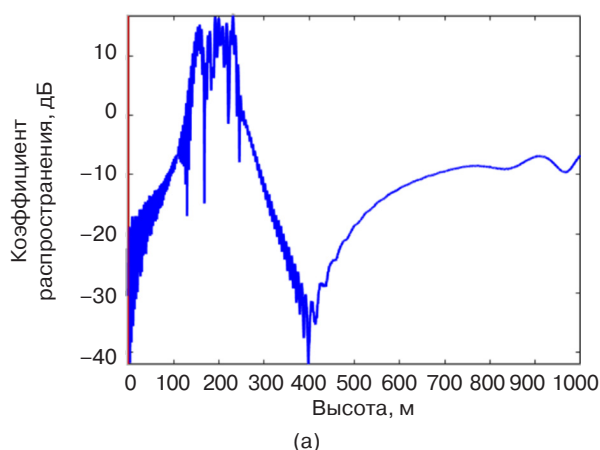


Рис. 11. Свойства распределения поля:
(а) коэффициент распространения для вертикального среза в точке 110 км,
(б) потери для горизонтального среза

по сравнению с волной в свободном пространстве. На рис. 11б показаны графики величины потерь в зависимости от расстояния между передатчиком и приемной ЦАР, из которого можно сделать вывод, что внутри тропосферного волновода электромагнитная волна теряет мощность на 15–20 дБ меньше по сравнению с радиосигналом в свободном пространстве или вне слоя захвата.

На рис. 12 представлены траектории лучей для рассматриваемого типа показателя рефракции.

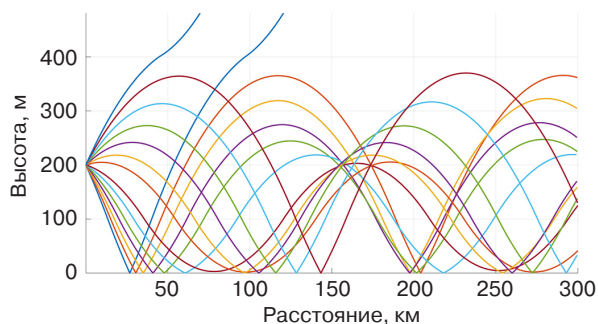


Рис. 12. Лучи, распространяющиеся в нижних слоях тропосферного волновода

Видно, что лучи могут как переотражаться от земной поверхности, так и преломляться на нижней и верхней границе слоев тропосферы.

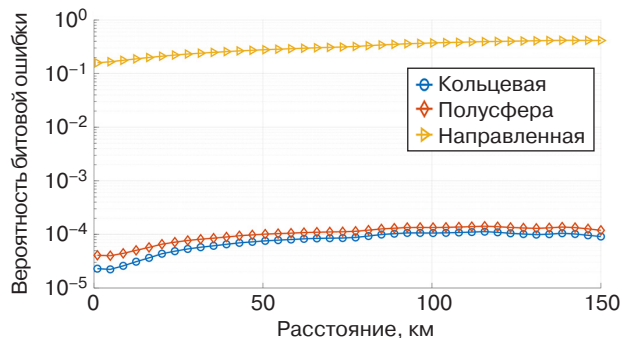
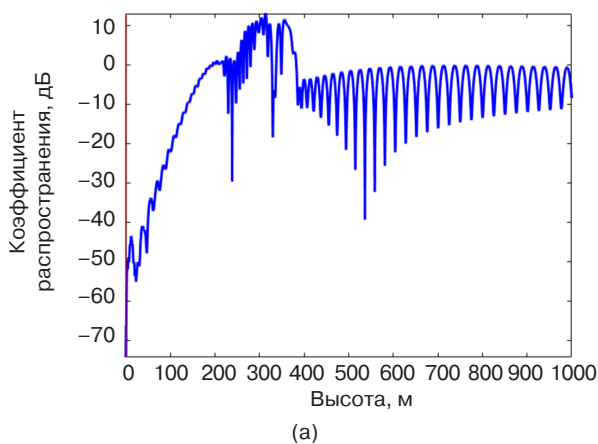


Рис. 13. Зависимость вероятности битовой ошибки от расстояния



Из графиков на рис. 13 видно, что кольцевая ЦАР обеспечивает самую низкую вероятность ошибки. Таким образом, анализируя рис. 11–13, можно сказать, что радиосигналы на частоте 5 ГГц могут достичь приемника, находящегося в более чем 100 км от передатчика, обеспечивая при этом величину вероятности битовой ошибки в пределах 10^{-5} , что является приемлемым для большинства современных беспроводных телекоммуникационных систем.

Эксперимент 3. Идеальный приподнятый волновод

Рассмотрим идеальный приподнятый волновод. Соответствующий ему M -профиль показан на рис. 14. Модифицированный M -профиль начинается с наклона 117 M -ед. км^{-1} для первых 250 м высоты и затем изменяется до $-100 M$ -ед. км^{-1} вплоть до 400 м, и затем возвращается к 117 M -ед. км^{-1} . Высота антенны – 300 м в пределах слоя захвата.

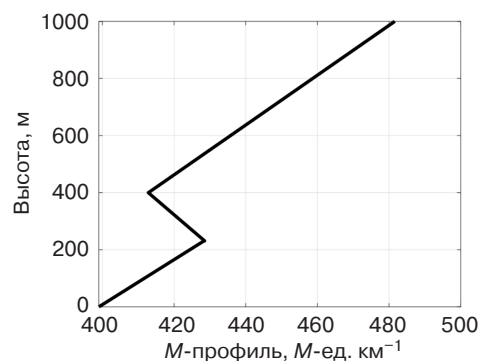


Рис. 14. Модифицированный M -профиль, характерный для приподнятого волновода

Из рис. 14 видно, что волновод в этом случае поднят и не касается поверхности Земли. На рис. 15 показано распределение электромагнитного поля

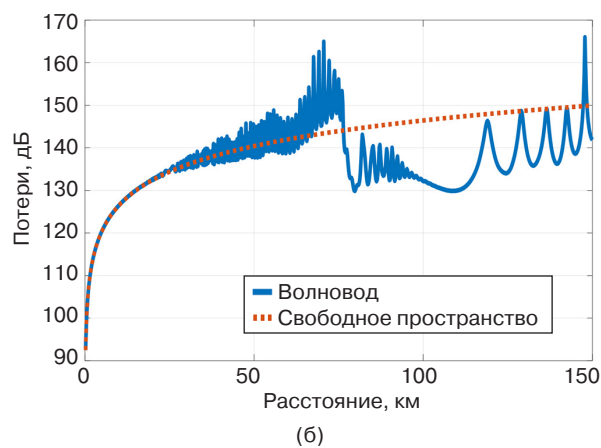


Рис. 15. Параметры распределения поля: (а) коэффициент распространения для вертикального среза в точке 80 км, (б) потери в горизонтальном срезе по уровню 50 м (синяя линия – в атмосфере, представленной на рис. 2; оранжевая пунктирная линия – в свободном пространстве)

в зависимости от расстояния от передатчика и высоты над поверхностью Земли.

Из рис. 15а видно, что электромагнитная волна с частотой 5 ГГц на высоте передатчика 300 м имеет большую мощность по сравнению со свободным прямолинейным распространением. Кроме того, из рис. 15б становится очевидным, что преимущество распространения внутри тропосферного волновода проявляется на расстояниях свыше 100 км, т.к. в этом случае потери на 20 дБ меньше, чем в свободном пространстве.

На рис. 16 показаны типичные траектории лучей для приподнятого волновода.

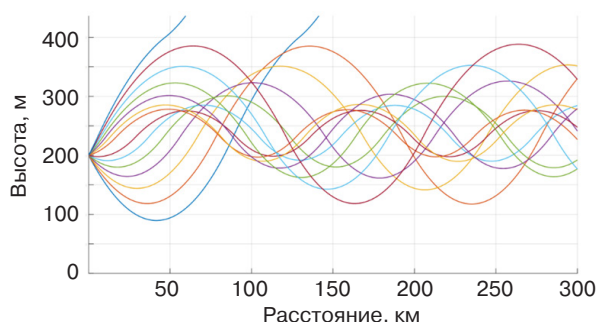


Рис. 16. Лучи, распространяющиеся в нижних слоях тропосферного волновода

Видно, что в этом случае лучи не достигают земной поверхности и испытывают только рефракцию на верхней и нижней границах изменения показателя рефракции.

На рис. 17 показаны графики зависимости вероятности битовой ошибки от расстояния между передатчиком и ЦАР, которая расположена внутри волновода также на высоте 300 м.

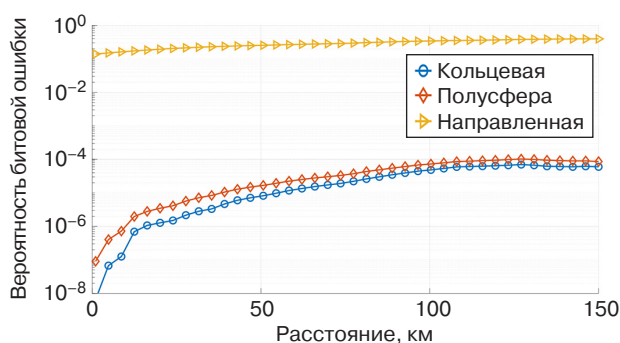


Рис. 17. Зависимость вероятности битовой ошибки от расстояния

Из графиков на рис. 17 видно, что кольцевая ЦАР обеспечивает самую низкую вероятность ошибки (10^{-6}) по сравнению с полусферической геометрией и простым направленным излучателем на дистанции до 50 км, для которых вероятность ошибки

равна 10^{-5} и 0.3 соответственно. Данная геометрия имеет преимущество, т.к. электромагнитное излучение, приходящее на решетку, внутри тропосферного волновода имеет незначительные значения углов склонения, т.е. большая часть приходится на угол $\varphi \approx 90^\circ$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Тропосферный волновод в нижних слоях атмосферы возникает, если происходит изменение модифицированного индекса рефракции от максимального значения у поверхности Земли до минимального – на определенной высоте. В этом случае электромагнитное излучение в диапазоне ультракоротких сантиметровых волн (5 ГГц) от передатчика будет распространяться не по прямой линии, а путем отражения от Земли (либо нижнего слоя захвата) и от верхнего слоя захвата. Предельные расстояния устойчивого приема достигают сотен километров, вызывая значительные затухания. Кроме того, в точке приема могут пребывать несколько лучей с разными амплитудами и фазами, т.е. имеет место многолучевое распространение. Для преодоления таких сложностей предполагается использовать антенные решетки с цифровым формированием диаграммы направленности на стороне приема.

Для корректного моделирования прохождения сигнала внутри тропосферного волновода и ЦАР в работе использовались несколько последовательных подходов: вычисление трасс распространения, вычисление потерь с учетом расстояния, индекса рефракции, высоты антенны и несущей частоты. Путем перебора находились лучи, оказавшиеся в раскрыве антенн ЦАР. На последнем этапе после оценки угловых координат лучей и процедуры цифрового диаграммообразования происходила оценка вероятности битовой ошибки.

Установлено, что лучшей формой антенной решетки совместно с цифровой пространственной обработкой является кольцевая форма.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-21-00125, <https://rscf.ru/project/23-21-00125/>.

ACKNOWLEDGMENTS

The study was supported by the Russian Science Foundation, project No. 23-21-00125, <https://rscf.ru/project/23-21-00125/>.

Вклад авторов

И.В. Пешков – постановка целей и задач исследования, разработка методов обработки, проведение исследования.

Д.Н. Борисов – планирование исследования, научное редактирование статьи, интерпретация и обобщение результатов.

Authors' contributions

I.W. Peshkov – setting the goals and objectives of the study, development of processing methods, conducting research.

D.N. Borisov – research planning, scientific editing of the article, interpretation and generalization of the results.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Schelleng J.C., Burrows C.R., Ferrell E.B. Ultra-shortwave propagation. In: *Proceedings of the Institute of Radio Engineers (Proc. I.R.E.)*. 1933;21(3):427–463. <https://doi.org/10.1109/JRPROC.1933.227639>
- Anderson K. Radar measurements at 16.5 GHz in the oceanic evaporation duct. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 1989;37(1):100–106. <https://doi.org/10.1109/8.192171>
- Иванов В.К., Шалыпин В.Н., Левадный Ю.В. Рассеяние ультракоротких радиоволн на тропосферных флуктуациях в приводном волноводе. *Известия вузов. Радиофизика*. 2009;52(4):307–317.
- Dinc E., Akan O.B. Beyond-line-of-sight communications with ducting layer. *IEEE Commun. Mag.* 2014;52(10):37–43. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2014.6917399>
- Ma J., Wang J., Yang C. Long-Range Microwave Links Guided by Evaporation Ducts. *IEEE Commun. Mag.* 2022;60(5):68–72. <https://doi.org/10.1109/MCOM.002.00508>
- Woods G.S., Ruxton A., Huddleston-Holmes C., Gigan G. High-Capacity, Long-Range, Over Ocean Microwave Link Using the Evaporation Duct. *IEEE J. Oceanic Eng.* 2009;34(3):323–330. <https://doi.org/10.1109/JOE.2009.2020851>
- Mentes Ş., Kaymaz Z. Investigation of Surface Duct Conditions over Istanbul, Turkey. *J. Appl. Meteor. Climatol.* 2007;46(3):318–337. <https://doi.org/10.1175/JAM2452.1>
- Пищин О.Н., Каламбацкая О.В. Особенности распространения радиоволн УВЧ диапазона в приземном и приводном тропосферном волноводе. *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика*. 2019;4:115–121. <https://doi.org/10.24143/2072-9502-2019-4-115-121>
- Пищин О.Н. Анализ и экспериментальные исследования затухания радиосигнала систем сотовой подвижной радиосвязи над водной гладью. *Известия ЮФУ. Серия: Технические науки*. 2009;1:43–49.
- Hartree D.R., Michel J.G.L., Nicolson P. Practical methods for the solution of the equations of tropospheric refraction. In: *Meteorological Factors in Radio-Wave Propagation. Report of a Conference. The Physical Society and The Royal Meteorological Society*. 1947. P. 127–168.
- Дедов Н.М., Толстых В.Д., Серебряков М.А. Влияние тропосферных волноводов на работу радиолокатора над морской поверхностью. В сб.: *Актуальные проблемы деятельности подразделений уголовно-исполнительной системы: Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции в 2-х т. Воронеж; 2020. Т. 1. С. 128–132*. <https://www.elibrary.ru/nptlot>
- Leontovich M.A., Fok V.A. Solution of propagation of electromagnetic waves along the Earth's surface by the method of parabolic equations. *J. Phys. USSR*. 1946;10(1):13–23.
- Ахияров В.В. Вычисление множителя ослабления при обратном рассеянии от земной поверхности методом параболического уравнения. *Журнал радиоэлектроники*. 2019;11. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2019.11.1>
- Zhang P., Lu Bai, Wu Z., Guo L. Applying the parabolic equation to tropospheric groundwave propagation: A review of recent achievements and significant milestones. *IEEE Trans. Antennas Propag. Mag.* 2016;58(3):31–44. <https://doi.org/10.1109/MAP.2016.2541620>
- Levy M. *Parabolic Equation Methods for Electromagnetic Wave Propagation*. London: IET; 2000. 336 p.
- Ozlem O., Gokhan A., Mustafa K., Levent S. PETOOL: MATLAB-based one-way and two-way split-step parabolic equation tool for radiowave propagation over variable terrain. *Computer Phys. Commun.* 2011;182(12):2638–2654. <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2011.07.017>
- Sirkova I. Propagation Factor and Path Loss Simulation Results for Two Rough Surface Reflection Coefficients Applied to the Microwave Ducting Propagation Over the Sea. *Progress In Electromagnetics Research M. (PIERM)*. 2011;17:151–166. <http://doi.org/10.2528/PIERM11020602>
- Zeng Y., Blahak U., Neuper M., Jerger D. Radar Beam Tracing Methods Based on Atmospheric Refractive Index. *J. Atmos. Oceanic Technol.* 2014;31(12):2650–2670. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-13-00152.1>
- Нечаев Ю.Б., Пешков И.В. Исследование цифрового диаграммообразования для оптимального помехо- и шумоподавления в антенных решетках различной формы с направленными излучателями. *Физика волновых процессов и радиотехнические системы*. 2022;25(2):73–82. <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2022.25.2.73-82>
- Schmidt R.O. Multiple Emitter Location and Signal Parameter Estimation. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 1986;AP-34(3):276–280. <https://doi.org/10.1109/TAP.1986.1143830>
- Balanis C., Ioannides P. *Introduction to Smart Antennas*. San Rafael: Morgan & Claypool Publishers; 2007. 174 p.

22. Dinc E., Akan O.B. Channel Model for the Surface Ducts: Large-Scale Path-Loss, Delay Spread, and AOA. *IEEE Trans. Antennas and Propag.* 2015;63(6):2728–2738. <http://doi.org/10.1109/TAP.2015.2418788>
23. Nechaev Y.B., Peshkov I.W. Simulation of Digital and Analog Spatial Filtering of VHF Signals in Channel with Losses due to Multiple Diffraction. In: *2022 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications*. 2022. <https://doi.org/10.1109/IEEECONF53456.2022.9744371>

REFERENCES

1. Schelleng J.C., Burrows C.R., Ferrell E.B. Ultra-shortwave propagation. In: *Proceedings of the Institute of Radio Engineers (Proc. I.R.E.)*. 1933;21(3):427–463. <https://doi.org/10.1109/JRPROC.1933.227639>
2. Anderson K. Radar measurements at 16.5 GHz in the oceanic evaporation duct. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 1989;37(1): 100–106. <https://doi.org/10.1109/8.192171>
3. Ivanov V.K., Shalyapin V.N., Levadny Y.V. Microwave scattering by tropospheric fluctuations in an evaporation duct. *Radiophys. Quantum. El.* 2009;52(4):277–286. <https://doi.org/10.1007/s11141-009-9133-z>
[Original Russian Text: Ivanov V.K., Shalyapin V.N., Levadny Y.V. Microwave scattering by tropospheric fluctuations in an evaporation duct. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Radiofizika*. 2009;52(4):307–317 (in Russ.).]
4. Dinc E., Akan O.B. Beyond-line-of-sight communications with ducting layer. *IEEE Commun. Mag.* 2014;52(10):37–43. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2014.6917399>
5. Ma J., Wang J., Yang C. Long-Range Microwave Links Guided by Evaporation Ducts. *IEEE Commun. Mag.* 2022;60(5): 68–72. <https://doi.org/10.1109/MCOM.002.00508>
6. Woods G.S., Ruxton A., Huddleston-Holmes C., Gigan G. High-Capacity, Long-Range, Over Ocean Microwave Link Using the Evaporation Duct. *IEEE J. Oceanic Eng.* 2009;34(3):323–330. <https://doi.org/10.1109/JOE.2009.2020851>
7. Mendes Ş., Kaymaz Z. Investigation of Surface Duct Conditions over Istanbul, Turkey. *J. Appl. Meteor. Climatol.* 2007;46(3):318–337. <https://doi.org/10.1175/JAM2452.1>
8. Pishchin O.N., Kalambatskaya O.V. Characteristics of UHF waves distribution in land and water surface tropospheric waveguide. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika = Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Science and Informatics*. 2019;4:115–121 (in Russ.). <https://doi.org/10.24143/2072-9502-2019-4-115-121>
9. Pishchin O.N. The analysis and experimental researches of attenuation of a radio signal of systems of a cellular mobile radio communication above a water smooth surface. *Izvestiya Yuzhnogo federal'nogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki (Izvestiya YuFU. Seriya: tekhnicheskie nauki) = Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*. 2009;1:43–49 (in Russ.).
10. Hartree D.R., Michel J.G.L., Nicolson P. Practical methods for the solution of the equations of tropospheric refraction. In: *Meteorological Factors in Radio-Wave Propagation. Report of a Conference. The Physical Society and The Royal Meteorological Society*. 1947. P. 127–168.
11. Dedov N.M., Tolstykh V.D., Serebryakov M.A. The influence of tropospheric ducts on the radar operation over the sea surface. In: *Actual Problems of the Activities of Departments of the Penal System: Collection of Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference: in 2 v. Voronezh*; 2020. P. 128–132 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/nptlot>
12. Leontovich M.A., Fok V.A. Solution of propagation of electromagnetic waves along the Earth's surface by the method of parabolic equations. *J. Phys. USSR*. 1946;10(1):13–23.
13. Akhiyarov V.V. Attenuation factor calculation for backscattering from the terrain using the parabolic equation technique. *Zhurnal radioelektroniki = J. Radio Electronics*. 2019;11 (in Russ.). <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2019.11.1>
14. Zhang P., Lu Bai, Wu Z., Guo L. Applying the parabolic equation to tropospheric groundwave propagation: A review of recent achievements and significant milestones. *IEEE Trans. Antennas Propag. Mag.* 2016;58(3):31–44. <https://doi.org/10.1109/MAP.2016.2541620>
15. Levy M. *Parabolic Equation Methods for Electromagnetic Wave Propagation*. London: IET; 2000. 336 p.
16. Ozlem O., Gokhan A., Mustafa K., Levent S. PETOOL: MATLAB-based one-way and two-way split-step parabolic equation tool for radiowave propagation over variable terrain. *Computer Phys. Commun.* 2011;182(12):2638–2654. <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2011.07.017>
17. Sirkova I. Propagation Factor and Path Loss Simulation Results for Two Rough Surface Reflection Coefficients Applied to the Microwave Ducting Propagation Over the Sea. *Progress In Electromagnetics Research M. (PIERM)*. 2011;17:151–166. <http://doi.org/10.2528/PIERM11020602>
18. Zeng Y., Blahak U., Neuper M., Jerger D. Radar Beam Tracing Methods Based on Atmospheric Refractive Index. *J. Atmos. Oceanic Technol.* 2014;31(12):2650–2670. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-13-00152.1>
19. Nechaev Y.B., Peshkov I.V. Study of digital diagram formation for optimum interference and noise reduction in antenna arrays of different shapes with directional radiators. *Fizika volnovykh protsessov i radiotekhnicheskie sistemy = Physics of Wave Processes and Radio Systems*. 2022;25(2):73–82 (in Russ.). <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2022.25.2.73-82>
20. Schmidt R.O. Multiple Emitter Location and Signal Parameter Estimation. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 1986;AP-34(3): 276–280. <https://doi.org/10.1109/TAP.1986.1143830>
21. Balanis C., Ioannides P. *Introduction to Smart Antennas*. San Rafael: Morgan & Claypool Publishers; 2007. 174 p.
22. Dinc E., Akan O.B. Channel Model for the Surface Ducts: Large-Scale Path-Loss, Delay Spread, and AOA. *IEEE Trans. Antennas and Propag.* 2015;63(6):2728–2738. <http://doi.org/10.1109/TAP.2015.2418788>

23. Nechaev Y.B., Peshkov I.W. Simulation of Digital and Analog Spatial Filtering of VHF Signals in Channel with Losses due to Multiple Diffraction. In: *2022 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications*. 2022. <https://doi.org/10.1109/IEEECONF53456.2022.9744371>

Об авторах

Пешков Илья Владимирович, к.ф.-м.н., доцент, кафедра физики, радиотехники и электроники, ФГБОУ ВО «Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина» (399770, Россия, Елец, ул. Коммунаров, д. 28). E-mail: ilvpeshkov@gmail.com. Scopus Author ID 7003332128, ResearcherID L-6734-2013, SPIN-код РИНЦ 8009-4805, <https://orcid.org/0000-0001-8370-6954>

Борисов Дмитрий Николаевич, к.т.н. доцент, заведующий кафедрой информационных систем, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет» (394018, Россия, Воронеж, Университетская пл., д. 1). E-mail: borisov@sc.vsu.ru. Scopus Author ID 54901090900, ResearcherID J-5289-2014, SPIN-код РИНЦ 6556-0285, <https://orcid.org/0000-0002-1265-7195>

About the authors

Ilya W. Peshkov, Cand. Sci. (Phys.–Math.), Associate Professor, Department of Physics, Radio Engineering and Electronics, Bunin Yelets State University (28, Kommunarov ul., Yelets, 399770 Russia). E-mail: ilvpeshkov@gmail.com. Scopus Author ID 7003332128, ResearcherID L-6734-2013, RSCI SPIN-code 8009-4805, <https://orcid.org/0000-0001-8370-6954>

Dmitry N. Borisov, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Information systems, Voronezh State University (1, Universitetskaya pl., Voronezh, 394018 Russia). E-mail: borisov@sc.vsu.ru. Scopus Author ID 54901090900, ResearcherID J-5289-2014, RSCI SPIN-code 6556-0285, <https://orcid.org/0000-0002-1265-7195>