2. *Сикарев А. А.* Оптимальный прием дискретных сообщений / А. А. Сикарев, А. И. Фалько. — М.: Связь, 1978.

3. *Петухов Ю. В.* Электромагнитная защищенность базовых станций речных АИС в условиях взаимных помех / Ю. В. Петухов, И. А. Сикарев // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. — СПб.: Изд-во политех. ун-та, 2008. — Вып. 2.

УДК 656.61.052:621.396.6:629.12.018(075.8)

А. А. Сикарев,
д-р техн. наук, профессор,
ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова;

С. Ф. Шахнов,
канд. техн. наук, доцент,
ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова

К РАСЧЕТУ НАПРЯЖЕННОСТИ ПОЛЯ В РАДИОКАНАЛАХ РЕЧНОЙ ЛОКАЛЬНОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ПОДСИСТЕМЫ ГЛОНАСС/GPS СРЕДНЕВОЛНОВОГО ДИАПАЗОНА

TO CALCULATION OF THE FIELD STRENGTH IN THE RADIOCHANNELS OF THE LOCAL RIVER DIFFERENTIAL SUBSYSTEM GLONASS/GPS OF MEDIUM WAVE RANGE

В статье рассматривается методика расчета напряженности поля средневолнового диапазона от вертикального точечного диполя в зоне действия контрольно-корректирующих станций (ККС) речной локальной дифференциальной подсистемы ГЛОНАСС/GPS на внутренних водных путях (ВВП) России. Приведены условия, допускающие использование асимптотических решений.

The article describes a method of calculation of medium wave range field intensity from a vertical point dipole in the area of control and correction stations (CCS) of river local differential system GLONASS/GPS in the inland waterways (IWW) of Russia. The conditions which permit the use of asymptotic solutions are presented.

Ключевые слова: напряженность электромагнитного поля, комплексная диэлектрическая проницаемость, векторный потенциал, зоны Френеля, численное расстояние, функция ослабления, функция Грина, кусочно-неоднородная трасса.

Key words: electromagnetic field, integrated tension dielectric permittivity, vector potential, Fresnel zone, numerical distance, attenuation function, Green's function, piecewise heterogeneous route.

РАЗВЕРТЫВАНИЕ речных локальных дифференциальных подсистем (РЛДПС) ГЛОНАСС/GPS на ВВП России сопряжено с решением задачи по оптимизации расположения цепочек ККС, обеспечивающих сплошное покрытие ВВП при заданном качестве приема, с учетом влияния взаимных помех от соседних станций и индустриальных помех. В свою очередь для этого необходимо определение напряженности поля излучателей в точках приема.

В общем виде решение данной задачи весьма затруднительно. Однако учет особенностей распространения радиоволн в конкретных условиях позволяет существенно упростить задачу. Так, рассмотрение задачи распространения радиоволн нижней границы средневолнового диапазона при предполагаемом размере зон действия ККС порядка 200÷300 км [1] позволяет не учитывать пространственную волну, отраженную от ионосферы, и считать замирания сигнала и взаимной помехи отсутствующими.

Также существенное упрощение задачи может быть достигнуто учетом особенностей влияния подстилающей поверхности радиотрасс. Подстилающая поверхность на ВВП России характеризуется широким разбросом ее электрических свойств (вещественная диэлектрическая проницаемость ε' и удельная электропроводность σ). От сухих песков в нижнем течении Волги ($\varepsilon' = 2$, $\sigma = 2{\cdot}10^6$) до болотистых почв среднего и нижнего течения Оби и Енисея ($\varepsilon' = 80$, $\sigma = 10^9$) [2]. Здесь и далее все величины представляются в системе СГСЕ. Влиянию вышеназванных факторов на возможность аппроксимации общего решения задачи определения напряженности поля излучателей и посвящена данная статья.

Комплексная диэлектрическая проницаемость ε связана с удельной электропроводностью среды σ следующим соотношением:

$$\varepsilon = \varepsilon' + i\varepsilon'' = \varepsilon' + i\,\frac{4\pi}{\omega}\,\sigma\,.$$

Напряженности магнитного и электрического полей H и E в воздухе при гармонических процессах связаны с плотностью тока в антенне J и проницаемостью среды ε уравнениями Максвелла вида:

$$\begin{aligned} \mathrm{rot}\,H &= -i\,k_0\,\varepsilon E + \frac{4\pi}{c}\,J; \\ \mathrm{rot}\,E &= i\,k_0 H, \end{aligned} \tag{1}$$

где $k_0 = \omega/c$; ω — круговая частота гармонических колебаний; c — скорость света.

Диапазон частот, используемый при передаче дифпоправок по каналам РЛДПС, соответствует длине волны λ порядка 1000 м (средние волны) [1]. Так как эффективная высота вертикальной антенны много меньше длины волны, то излучающую антенну можно рассматривать как вертикальный диполь. Тогда для отыскания решений уравнений (1) удобно использовать векторный потенциал Герца П, связанный с вектором H соотношением $H = -i\,k_0\varepsilon\,\mathrm{rot}\,\Pi$ и определяющий решение уравнений (1) в случае, если он удовлетворяет волновому уравнению:

$$\nabla^2\Pi + \varepsilon k^2\,\Pi = -i\,\frac{4\pi}{\omega\,\varepsilon}\,J, \tag{2}$$

где $k^2 = \varepsilon\,\omega^2/c^2$.

Для упрощения расчетов сферическая поверхность земли в области решения может заменяться плоской. Критерием допустимости такой замены являются условия [3]:

$$R << \sqrt[4]{a^2\lambda^3\,\frac{\sigma}{2\pi^2 c}},$$

где R — расстояние от источника до точки наблюдения; a — радиус Земли. Для большинства почв, встречающихся на ВВП России, проводимость лежит в пределах $\sigma = 2\cdot10^7 \ldots 10^9$ с$^{-1}$ [2], что для погрешности замены в 5 % соответствует условию $R \le 20{\div}60$ км.

В случае плоской поверхности для вертикально поляризованного излучения вектор П будет иметь только одну вертикальную составляющую и напряженность электрического поля в точке приема будет связана с потенциалом Герца выражением

$$E_z = \nabla^2\Pi_z + \frac{\partial^2}{\partial^2}\,\Pi_z. \tag{3}$$

Для решения уравнения (2) необходимо задать граничные условия на поверхности раздела двух сред: атмосферы и земли. Для плоской задачи при вертикальной антенне граничные условия будут иметь вид

$$\varepsilon_1\Pi_z^{(1)} = \varepsilon_2\Pi_z^{(2)},\ z = 0. \tag{4}$$

Решение уравнения (2) с граничными условиями (4) для точечного источника приводит к интегральному уравнению вида [4, с. 16–22]:

$$\Pi(R) = -\frac{1}{i\varepsilon\omega}\int\limits_{V'}\frac{J\exp(ik_0R)}{R}dV' + \frac{1}{4\pi}\int\limits_{S'}\left\{\frac{\partial\Pi(R')}{\partial n}\frac{\exp(ik_0r)}{r} - \Pi(R')\frac{\partial}{\partial n}\left(\frac{\exp(ik_0r)}{r}\right)\right\}dS'. \qquad (5)$$

Здесь объемный интеграл определяет векторный потенциал поля, создаваемый в точке наблюдения сферической волной в бесконечном однородном пространстве токами вертикальной антенны. Поверхностный же интеграл определяет поле от вторичных источников, индуцируемых на поверхности земли первичной волной и согласно принципу Гюйгенса накладывающихся на невозмущенное поле излучателя. Так как максимальный размер зон действия ККС на суше составляет порядка 300 км, то для излучения средневолнового диапазона с длиной волны 1000 м отражением от ионосферной можно пренебречь. Тогда поверхность интегрирования можно представить в виде бесконечной полусферы, охватывающей источник излучения 0 и точку наблюдения A, основанием которой является поверхность земли (рис. 1).

Вертикальную антенну можно рассматривать как точечный диполь при условии, что [3]:

$$l^2 << \frac{R\lambda}{\pi}, \qquad (6)$$

где l — длина диполя.

При $\lambda = 1000$ м для $l = 10$ м условие (6) выполняется уже при R порядка километра. Тогда объемный интеграл в выражении (5) примет вид

$$\Pi_{zV}(R) = \frac{p\exp(ik_0R)}{\varepsilon R}, \qquad (7)$$

где p — дипольный момент, равный $i{\cdot}I{\cdot}h/\omega$ (I — ток в антенне, h — ее высота).

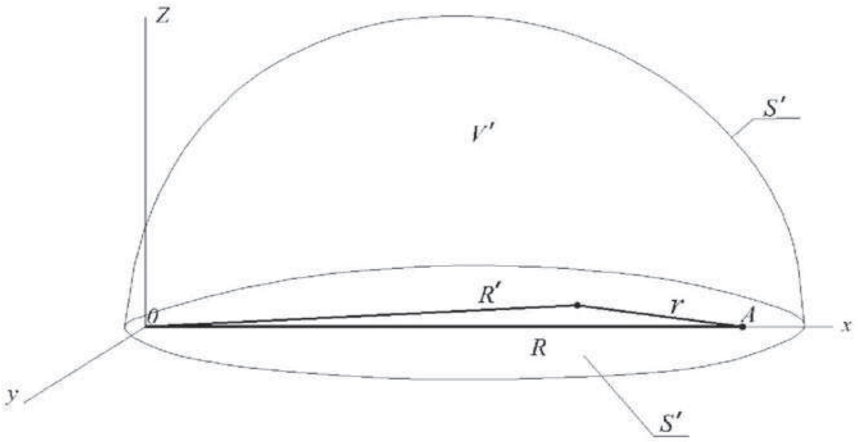

Рис. 1. Область интегрирования, R' — текущая точка интегрирования

Интеграл по поверхности бесконечной полусферы в пределе исчезает и остается только интеграл по поверхности земли. Тогда уравнение (5) с учетом (7) примет вид

$$\Pi_z(R) = \frac{p\exp(ik_0R)}{\varepsilon R} + \frac{1}{4\pi}\int\limits_{S'}\left\{\frac{\partial\Pi(R')}{\partial z}\frac{\exp(ik_0r)}{r} - \Pi_z(R')\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\exp(ik_0r)}{r}\right)\right\}dS'. \qquad (8)$$

Для исключения одного из слагаемых в подынтегральной функции в выражении (8) можно ввести функцию Грина вида [3]: $v = v_0 + \varphi$, где $v_0 = \dfrac{\exp(ik_0R)}{R}$.

При этом φ выбирается так, чтобы на поверхности интегрирования в нуль обращалось либо v (условие Дирихле), либо $\dfrac{\partial v}{\partial n}$ (условие Неймана). Тогда уравнение (8) преобразуется либо в выражение

$$\Pi_z(R) = \frac{p\exp(ik_0R)}{\varepsilon R} + \frac{1}{2\pi}\int\limits_{S'}\Pi_z(R')\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\exp(ik_0r)}{r}\right)dS', \qquad (9)$$

либо в выражение

$$\Pi_z(R) = \frac{p\,\exp(i k_0 R)}{\varepsilon R} + \frac{1}{2\pi}\int_{S'} \frac{\partial \Pi(R')}{\partial z}\frac{\exp(i k_0 r)}{r} d S'. \tag{10}$$

Для $\lambda = 1000$ м большинство видов почв, встречающихся на ВВП, включая русла рек и озер, дают $|\varepsilon|>>1$ [2]. Это условие позволяет упростить решение уравнений (9) и (10).

Волновая зона, в которой справедливы выражения (9) или (10), определяется условием [3]:

$$1 \le \frac{2\pi R}{\lambda}, \text{ то есть } R \ge \frac{1000}{2\pi} \ge 160 \text{ м.}$$

Область поверхности земли, существенная для вычисления интеграла (8), при расположении источника и точки наблюдения вблизи плоской поверхности ($z = 0$), как показано в работе [3], определяется первой зоной Френеля, имеющей в этом случае форму вытянутого эллипса (рис. 2) с полуосями: $a_1 = R + \lambda/8$, $b_1 = \sqrt{\frac{\lambda R}{8}}$.

Так как в средневолновом диапазоне при исследовании поля на расстояниях порядка 200÷300 км от источника $b_1 << a_1$, то интеграл по поверхности можно свести к интегралу вдоль линии, которую называют «трассой» радиосигнала.

Переход от уравнений Максвелла (1) к волновому уравнению (2) возможен только при постоянных значениях ε. Для расчета поля над кусочно-однородной поверхностью можно воспользоваться методом, предложенным Фейнбергом [3].

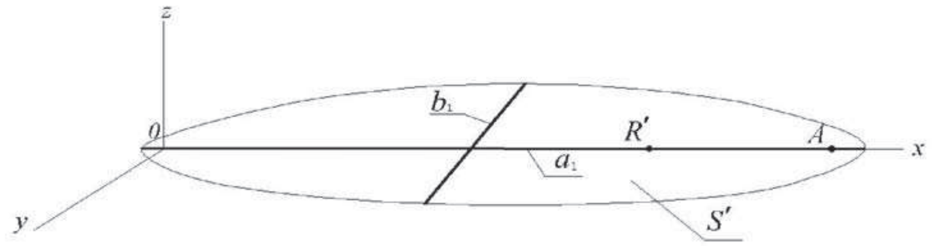

Рис. 2. Существенная зона поверхности интегрирования (первая зона Френеля)

В случае неоднородной почвы нельзя утверждать, что вектор П будет иметь только вертикальную составляющую. Поэтому удобнее рассматривать сразу поле E, которое на поверхности земли можно представить как произведение в данной точке невозмущенного поля E_0 от источника и медленно меняющейся функции ослабления w. Тогда, с учетом выражений (3) и (7) имеем

$$E_z^0(R) = \frac{\exp(i k_0 R)}{R}, \quad E(R) = E_z^0(R)\, w(R). \tag{11}$$

При расположении источника и точки наблюдения на поверхности земли в качестве функции Грина выбираем $v_+ = \left\{ 2\frac{\exp(i k_0 \left| R - R' \right|)}{\left| R - R' \right|} \right\} w_0 \left| R - R' \right|$, где w_0 — функция ослабления для диполя в точке (x', y') над условной вспомогательной поверхностью с ε_0, обозначаемая как y_0. Тогда с учетом уравнения (3) граничные условия на поверхности примут вид

$\frac{\partial E}{\partial z} = -\frac{i k E_z}{\sqrt{\varepsilon}}$ и по аналогии с выводом уравнения (10) получим

$$E_z(R) = \frac{\exp(i k_0 R)}{\varepsilon R} y_0(s_0 R) + \frac{i k_0}{2\pi}\int_{S'} \left(\frac{1}{\sqrt{\varepsilon(x)}} - \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0}} \right) \frac{\exp(i k_0 r) E_z(r) y_0(s_0 r)}{r} d S'. \tag{12}$$

Подставляя (12) в уравнение (11), при постоянстве ε по оси y получим функцию ослабления:

$$w(R) = y_0(s_0 R) + i\sqrt{\frac{R}{\pi}}\int_0^R \left(\sqrt{s(x')} - \sqrt{s_0} \right) w(x') \frac{y_0(s_0 r)}{\sqrt{x'(R - x')}} d x', \tag{13}$$

где $s(x') = \dfrac{ik_0}{2\varepsilon(x')}$, $s_0 = \dfrac{ik_0}{2\varepsilon_0} = \text{const.}$

Для кусочно-однородной трассы из уравнения (13) получим

$$w(R) = y_0(s_0R) + i\sqrt{\frac{R}{\pi}}\sum_{j=1}^{N}\int_{x_{j-1}}^{x_j}\left(\sqrt{s_j(x')} - \sqrt{s_0}\right)w(x')\frac{y_0(s_0\, r)}{\sqrt{x'(R-x')}}dx', \quad (14)$$

где N — число однородных участков трассы; j — номер участка; sx, $s(R-x)$, sR — численные расстояния.

При больших численных расстояниях каждого из участков ($|s_j(x_j - x_{j-1})|>1$) нормированные функции ослабления $y(sx)$ можно заменить их асимптотическими значениями:

$$y(s_j(x_j - x_{j-1})) = -\frac{1}{2s_j(x_j - x_{j-1})}.$$

Тогда функция ослабления окончательно примет вид

$$w(R) = -\frac{1}{2R\sqrt{s_1 s_N}}. \quad (15)$$

Амплитуда напряженности поля точечного диполя в бесконечном однородном воздушном пространстве определяется выражением [3]:

$$|E(R)| = -\frac{3\cdot 10^2\sqrt{P}}{R}\ \text{mВ/м}, \quad (16)$$

где P — мощность передатчика в кВт; R — в км.

Подставляя выражения (15) и (16) в формулу (11), окончательно получим

$$|E(R)| = -\frac{3\cdot 10^2\sqrt{P}}{2R^2\sqrt{s_1 s_N}}\ \text{mВ/м}. \quad (17)$$

Таким образом, выражение (17) позволяет рассчитывать напряженность поля контрольно-корректирующей станции при представлении ее излучающей антенны в виде точечного вертикального диполя. При этом рассматривается излучение средневолнового диапазона при распространении излучения вдоль плоской кусочно-однородной трассы с N участками, для которых известны ε' и σ. Существенная зона интегрирования принимается равной первой зоне Френеля, которая имеет форму сильно вытянутого эллипса. При этом считаем, что электрические параметры почвы на каждом из участков постоянны как в продольном, так и в поперечном направлении. Выражение (17) справедливо в диапазоне расстояний от источника 20÷60 км для большинства почв, присутствующих на ВВП России, и значительных размерах первого и последнего однородного участка ($sx > 1$), что часто имеет место при исследовании влияния индустриальных помех на помехозащищенность радиоканалов ЛРДПС.

Список литературы

1. *Каретников В. В.* Топология дифференциальных полей и дальность действия контрольно-корректирующих станций высокоточного местоопределения на внутренних водных путях / В. В. Каретников, А. А. Сикарев. — 2-е изд. — СПб.: ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2013. — 525 с.
2. *Кашпровский В. Е.* Экспериментальное исследование распространения радиоволн / В. Е. Кашпровский. — М.: Наука, 1980. — 151 с.
3. *Фейнберг Е. Л.* Распространение радиоволн вдоль земной поверхности / Е. Л. Фейнберг. — 2-е изд. — М.: Наука: Физматлит, 1999. —496 с.
4. *Леонтович М. А.* Об одном методе решения задач распространения радиоволн по поверхности земли / М. А. Леонтович // Изв. АН СССР. Сер. «Физика». — 1944 . — Т. 8.