

ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРИЕМНОЙ АНТЕННЫ В РАМКАХ ВОЛНОВОДНОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ КВ-ПОЛЯ

RECEIVING ANTENNA ELECTRODYNAMIC MODEL IN TERMS OF WAVEGUIDE REPRESENTATION OF HF FIELD

В.В. Хахинов

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, khakhin@iszf.irk.ru*

V.V. Khakhinov

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, khakhin@iszf.irk.ru*

Аннотация. Важной частью радиоканала является приемная антенна, при математическом моделировании характеристик которой требуется электродинамический подход. Со времен изобретения радио и при последующих теоретических исследованиях передачи радиосигналов сложилась следующая ситуация: во сколько раз число приемных антенн превосходит число излучающих, во столько же раз им оказано меньше внимания в исследованиях. Рассматривается задача о построении электродинамической модели приемной антенны в рамках волноводного представления КВ-поля. Конструктивно антенна рассматривается в виде металлических проводов конечной длины и произвольной конфигурации. Расчет распределения тока в антенне проводится на основе теории длинных линий и метода нормальных волн. Математическим представлением электродинамической модели приемной антенны являются расчетные выражения для коэффициентов приема нормальных волн. Они отражают влияние характеристик приемной антенны, в том числе ее диаграммы направленности, на эффективность преобразования энергии внешнего падающего КВ-поля в энергию возбуждаемых волн тока и установившееся распределение полного тока в антенне. На их основе выведено выражение для расчета действующей длины приемной антенны.

Полученные математические выражения электродинамической модели приемной антенны не противоречат принципу взаимности антенн.

Представлены расчетные формулы для коэффициентов приема и возбуждения электромагнитной модели изотропной антенны.

Ключевые слова: КВ-поле, приемная антенна, волновод Земля — ионосфера, метод нормальных волн.

Abstract. The receiving antenna is an important part of a radio channel that requires electrodynamic approach in mathematical simulation of its characteristics. Since the invention of radio, and due to further theoretical studies of radio signal transmission, the following situation has arisen: researchers' attention to receiving antennas is inversely proportional to the factor by which their number exceeds the number of transmitting antennas. We address the problem of building a receiving antenna electrodynamic model in terms of a waveguide representation of HF field. Structurally, the antenna is considered as metal wires of a finite length and arbitrary configuration. Current distribution in antenna is calculated using the long-line theory and normal-mode approach. The mathematical representation of the receiving antenna electrodynamic model is calculation expressions for receiving coefficients of normal modes. They reflect the effects of receiving antenna characteristics, including its directional pattern, on effectiveness of the incident HF field energy conversion into the energy of the driven current waves and final distribution of net current in antenna. These expressions are used to derive the expression to calculate the effective length of the receiving antenna.

The obtained mathematical expressions of the receiving antenna electrodynamic model do not contradict the principle of antenna reciprocity.

We present calculation formulas for the receiving coefficients and excitation of the isotropic antenna electromagnetic model.

Keywords: HF field, receiving antenna, Earth — ionosphere waveguide, normal-mode approach.

ВВЕДЕНИЕ

Большинство задач при проектировании систем радиосвязи решается методом математического моделирования. Цель моделирования — создание расчетной модели радиоканала, той части всего канала связи, в которой информационный сигнал имеет пространственное распределение [Khakhinov, Kurkin, 2006]. Эти модели исчерпывающе характеризуются передаточной функцией и определяют характеристики выходного сигнала (модуляция напряжения или тока на выходе приемной антенны)

при известных характеристиках входного сигнала (модуляция напряжения или тока на входе передающей антенны). Структурно модель радиоканала в общем случае состоит из передающей антенно-фидерной системы, среды распространения радиоволн и приемной антенно-фидерной системы. В этом случае передаточную функцию радиоканала можно представить произведением передаточных функций каждой из составляющих.

При коротковолновой (КВ) связи составной частью радиоканала является волновод Земля — ионосфера. Антенно-фидерные системы представляют собой

металлические проволочные конструкции, расчет распределения тока в которых проводится в рамках теории длинных линий [Айзенберг и др., 1985] или теории скин-эффекта [Вайнштейн, 1988] с использованием приближенных граничных условий Леонтовича [Леонтович, 1985]. Электродинамические модели передающих и приемных антенн определяются представлением электромагнитного поля.

В рамках волноводного представления распространения КВ-радиоволн в волноводе Земля — ионосфера разработан метод нормальных волн (МНВ) [Куркин и др., 1981] для расчета характеристик поля с учетом распределения тока в произвольной передающей антенне [Куркин, Хахинов, 1984]. Первые результаты моделирования декаметрового радиоканала на основе МНВ представлены в [Алтынцева и др., 1987]. Однако рассматриваемый радиоканал не содержал приемную антенну, т. е. результатом работы стала модель распространения КВ-радиоволн, аналогичная модели представленной в [Пономарчук и др., 2014]. В работе [Khakhinov, 2004] представлена упрощенная модель декаметрового радиоканала с изотропными передающей и приемной антеннами.

Использовать известную теорему взаимности антенн [Фейнберг, 1961] для определения значения тока на выходе приемной антенны не представляется возможным. Из теоремы следует, что направленные свойства произвольной антенны одинаковы при ее работе на излучение и прием, но рассчитать распределение уровня тока в ней нельзя.

Впервые расчет распределения тока в приемной антенне на основе МНВ в электродинамической постановке задачи был проведен в [Хахинов, 2000]. Первые результаты, полученные при создании электродинамической модели приемной антенны в волноводном представлении падающего КВ-поля, были представлены в трудах конференции [Khakhinov, 2002].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Во внешнем КВ-поле расположена приемная антенна, выполненная из металлических проводов конечной длины и произвольной конфигурации. Предполагается, что антенна не нарушает структуру внешнего поля. Используется геоцентрическая система координат с полярной осью, проходящей через фазовый центр передающей антенны. Распределение тока в передающей антенне можно представить в виде произведения двух функций: $\mathbf{I}(r)$, определяющей пространственное распределение, и $u(t)$, описывающей временную зависимость и называемую сигналом. Моделирование процессов распространения сигнала в КВ-радиоканалах является задачей многих исследований.

Цель настоящей работы заключается в построении электродинамической модели приемной антенны, математическое представление которой позволит рассчитывать значение тока на приемном конце по характеристикам внешнего КВ-поля.

КОЭФФИЦИЕНТЫ ПРИЕМА НОРМАЛЬНЫХ ВОЛН

Электродинамическая модель приемной антенны использует представление внешнего электромагнит-

ного поля, которое, в свою очередь, определяется методом решения электродинамической задачи пространства радиоволн. Построение модели приемной антенны проведено в рамках волноводного представления КВ-поля. Для простоты и наглядности рассматривается сферически-симметричная модель волновода Земля — ионосфера. Характеристики поля рассчитываются на основе МНВ [Bremmer, 1949, Куркин и др., 1981, Khakhinov, 2000].

Ток возбуждается составляющей электрического поля вдоль оси провода E_r , значение которой берется в точках, бесконечно близких к поверхности провода [Вайнштейн, 1988]. На элементе длины провода dl электрическое поле наводит электродвижущую силу (ЭДС):

$$d\varepsilon(r_l) = E(r_l)dl.$$

В электродинамическом рассмотрении провод антенны представляет собой длинную однородную линию с распределенными вдоль нее ЭДС. Для расчета распределения тока в антенне воспользуемся методом наложения бегущих волн [Лавров, Князев, 1965].

В сферически-симметричном волноводе падающее электромагнитное поле распадается на поле волн ТМ-типа (со значком «e»), содержащее E_r и E_θ компоненты электрического поля, и поле волн ТЕ-типа (со значком «m»), содержащее E_φ -компоненту. Выражение для ЭДС, индуцируемой на элементе dl антенны, можно записать в виде:

$$\begin{aligned} d\varepsilon(r_l) &= E(r_l)dl = d\varepsilon^e(r_l) + d\varepsilon^m(r_l) = \\ &= [(\mathbf{e}_r \mathbf{e}_r)E_r(r_l) + (\mathbf{e}_\theta \mathbf{e}_\theta)E_\theta(r_l)]dl + \\ &+ (\mathbf{e}_\varphi \mathbf{e}_\varphi)E_\varphi(r_l)dl. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь $\mathbf{e}_r, \mathbf{e}_\theta, \mathbf{e}_\varphi$ — единичные орты системы координат, $\mathbf{r}_l = (r_l, \theta_l, \varphi_l)$ — радиус-вектор элемента приемной антенны, \mathbf{e}_l — единичный орт вдоль dl .

В общем случае выражение для j -й компоненты поля представляет собой ряд по нормальным волнам

$$E_j(r_l) = \frac{1}{r_l} \sum_n A_n R_{jn}(r_l) D_{jn}(\mathbf{I}, \varphi_l) e^{i(v_n \theta_l - \pi/4)}. \quad (2)$$

Здесь A_n — амплитудный множитель, зависящий от выбранной системы единиц и мощности передатчика; $D_{jn}(\mathbf{I}, \varphi_l)$ — коэффициенты возбуждения нормальных волн, характеризующие распределение излученной энергии по нормальным волнам передающей антенной с заданным распределением тока $\mathbf{I}(r)$ [Куркин, Хахинов, 1984]; R_n и v_n — собственные функции и собственные значения соответствующих краевых задач для ТМ- и ТЕ-волн.

Индукционная ЭДС порождает две бегущие волны тока: от dl к приемному концу антенны и к концу антенны с нагрузочным сопротивлением Z . На концах антенны волны частично отражаются, частично поглощаются в нагрузочном сопротивлении или уходят по фидерной линии в приемник. При расчете тока использовался метод наложения бегущих волн. Суммируя все составляющие бегущих и отраженных волн, можно, согласно [Лавров, Князев, 1965], получить выражение для тока в произвольной точке антенны. Значение тока на приемном конце антенны можно записать в виде

$$dj_0 = \frac{Y(l)}{W} d\varepsilon. \quad (3)$$

Здесь функция

$$Y(l) = \frac{e^{ikl} + p_F e^{ikl} + p_Z e^{ik(2L-l)} + p_F p_Z e^{ik(2L-l)}}{2(1 - p_F p_Z e^{i2kl})}$$

определяет распределение тока в антенне с учетом условий нагрузки на обоих концах, W — волновое сопротивление провода, k — волновое число, $p_F = (W - Z_F) / (W + Z_F)$ и $p_Z = (W - Z) / (W + Z)$ — коэффициенты отражения тока от концов антенны, Z_F — входное сопротивление фидерной линии, нагруженной приемным устройством, L — длина провода антенны.

Подставим (1) в (3) с использованием выражений (2) для компонент поля. Значение полного выходного тока на конце антенны $\mathbf{r}_F = (r_F, \theta_F, \varphi_F)$, нагруженной фидерной линией, определяется интегрированием по длине приемной антенны:

$$J_F = \sum_n A_n \left(D_n^e P_n^e e^{iv_n^e \theta_l} + D_n^m P_n^m e^{iv_n^m \theta_l} \right). \quad (4)$$

При интегрировании использовано условие малости линейных размеров антенны по сравнению с расстоянием до передающей антенны. Функции

$$P_n^e = \int_l \frac{Y(l)}{W} \left[(\mathbf{e}_r \mathbf{e}_l) \frac{v_n}{kr_l} R_n^e(r_l) - (\mathbf{e}_\theta \mathbf{e}_l) \frac{dR_n^e(r_l)}{ik\varepsilon' dr} \right] \times e^{-iv_n^e \theta_l \cos(\varphi_F - \varphi_l)} dl, \quad (5)$$

$$P_n^m = \int_l (e_\varphi \mathbf{e}_l) \frac{Y(l)}{W} R_n^m(r_l) e^{-iv_n^m \theta_l \cos(\varphi_F - \varphi_l)} dl$$

характеризуют уровень индуцируемого тока составляющими ТМ- и ТЕ-поля отдельной нормальной волны и определяются параметрами приемной антенны. Поэтому $P_n^{e,m}$ логично назвать коэффициентами приема нормальных волн соответствующей поляризации.

Расчетные выражения (5) составляют математическое представление электродинамической модели приемной антенны в рамках волноводного представления поля КВ-радиоволн. Они отражают влияние характеристик приемной антенны, в том числе ее диаграммы направленности (ДН), на эффективность преобразования энергии внешнего КВ-поля в энергию возбуждаемых волн тока и установившегося распределения полного тока в антенне. В зависимости от конструкции антенны и граничных условий на концах может установиться распределение тока с узлом на приемном конце антенны, что приведет к отсутствию сигнала в приемнике. Такой же результат можно получить, если передатчик работает с направления, в котором ДН антенны (коэффициенты приема нормальных волн) имеет низкий (близкий к нулю) уровень приема.

В работе [Хахинов, 2000] показано, что коэффициенты приема нормальных волн соответствуют выражениям для коэффициентов возбуждения нормальных волн антенны с произвольно заданным распределением полного тока при работе на излуче-

ние. Эффективность возбуждения и приема нормальных волн одной антенной одинакова при работе в режиме передачи и приема. Это означает, что полученные математические выражения электродинамической модели приемной антенны не противоречат принципу взаимности антенн.

Однако строить электродинамические модели антенны в режиме излучения и приема приходится раздельно в зависимости от поставленной задачи.

ДЕЙСТВУЮЩАЯ ДЛИНА ПРИЕМНОЙ АНТЕННЫ

Одной из основных характеристик приемной антенны считается действующая длина (высота), определяемая как отношение напряжения на входе приемника (приемном конце антенны) к значению напряженности поля падающей волны [Лавров, Князев, 1965]:

$$h_d = \frac{J_F}{E(r_F)} (Z_A + Z_F), \quad (6)$$

где Z_A — входное сопротивление антенны с учетом значения нагрузочного сопротивления Z .

Если преобразовать выражение для $Y(l)$ к виду $Y(l) = \frac{\tilde{Y}(l)}{Z_A + Z_F}$, выражение для действующей длины антенны запишется в виде

$$h_d = \frac{1}{E(r_F)} \sum A_n \left(D_n^e \tilde{P}_n^e e^{iv_n^e \theta_s} + D_n^m \tilde{P}_n^m e^{iv_n^m \theta_s} \right), \quad (7)$$

где \tilde{P}_n^e и \tilde{P}_n^m определяются по формулам (5) с заменой $Y(l)$ на $\tilde{Y}(l)$.

МОДЕЛЬ ИЗОТРОПНОЙ АНТЕННЫ

Нередко в исследовательских задачах необходимо исключить факторы влияния направленных свойств приемной и/или передающей антенн, например, при исследовании влияния геофизических параметров радиоканала на радиофизические характеристики КВ-сигнала. Для решения необходима модель радиоканала с антеннами, обладающими изотропными ДН при излучении и приеме.

В рассматриваемой задаче достаточно ограничиться ВКБ (Вентцеля — Крамерса — Бриллюэна) представлением радиальных функций [Куркин и др., 1981]

$$R_n^{e,m} = C_n \left[e^{iX_n^{e,m}} + e^{-iX_n^{e,m}} \right]. \quad (8)$$

Здесь C_n — нормировочный коэффициент, X_n определяются геофизическими свойствами волновода Земля — ионосфера.

Воспользуемся методом анализа, использованным в [Khakhinov, 2000]. Он основан на приближенной формуле суммирования Пуассона [Попов, Потехин, 1982]. Ряд (2) преобразуется в интеграл, который вычисляется методом стационарной фазы. Получаемые расчетные формулы просты, и каждая величина имеет известную геометрическую интерпретацию [Khakhinov, 2000, 2002].

Выделим в формулах для вычисления $D_n^{e,m}$ [Куркин, Хахинов, 1984] функции, определяющие процесс преобразования энергии возбуждающего тока в передающей антенне в энергию КВ-поля и ее распределение по нормальным волнам. В формулах для вычисления $P_n^{e,m}$ выделим функции, определяющие процесс преобразования распределенной по нормальным волнам энергии падающего КВ-поля в энергию тока в приемной антенне. Эти функции зависят от электрических параметров и геометрии антенн и волновода (электрических свойств подстилающей поверхности). Условием изотропности антенн является равенство этих функций постоянной величине (единице). Тогда нормированные коэффициенты возбуждения и приема нормальных волн для изотропных антенн имеют вид

$$D_n(\mathbf{I}) = I \frac{C_n}{kr_l} e^{-iX_n(r_l)},$$

$$P_n = \frac{1}{W} \frac{C_n}{kr_F} e^{-iX_n(r_F)}. \quad (9)$$

Здесь r_l — радиальная координата фазового центра передающей антенны.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Построена электродинамическая модель приемной антенны в рамках метода нормальных волн. Математическим представлением модели являются формулы (5) для расчета коэффициентов нормальных волн P_n^e и P_n^m . Они отражают влияние характеристик приемной антенны — в первую очередь, ее направленные свойства, при преобразовании энергии ТЕ- и ТМ-волн падающего электромагнитного поля в энергию колебаний тока.

Создание электродинамической модели приемной антенны позволили завершить построение модели ионосферного радиоканала [Khakhinov, Kurkin, 2006] и получить в общем виде выражение для передаточной функции. Модель использовалась для анализа результатов наклонного зондирования ионосферы, полученных на сети ЛЧМ-иозондов ИСЗФ СО РАН.

Полученные формулы для расчета коэффициентов возбуждения и приема нормальных волн практически для всех типов проволочных антенн, используемых в КВ-диапазоне, вошли в состав аппаратно-программного комплекса диагностики и прогноза ионосферы, плазмосферы и КВ-радиоканала. Комплекс разработан в Институте солнечно-земной физики СО РАН и активно используется в фундаментальных и прикладных исследованиях.

Создана и зарегистрирована программа [Куркин и др., 2017], в которой расчет характеристик нормальных волн проводится с учетом свойств используемой передающей антенны. Планируется регистрация программы, в которой расчет амплитудных характеристик КВ-сигналов на основе метода нормальных волн проводится с учетом планируемых или используемых приемно-передающих антенно-фидерных систем.

Работа выполнена в рамках базового финансирования программы ФНИ И.12. Результаты получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Ангара», <http://ckp-rf.ru/ckp/3056>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Айзенберг Г.З., Белоусов С.П., Журбенко Э.М. и др. Коротковолновые антенны. М.: Радио и связь, 1985. 536 с.
- Алтынцева В.И., Ильин Н.В., Куркин В.И. и др. Моделирование декаметрового радиоканала на основе метода нормальных волн // Техника средств связи. Серия СС. М.: Экос, 1987. Вып. 5. С. 28–34.
- Вайнштейн Л.А. Электромагнитные волны. М.: Радио и связь, 1988. 440 с.
- Куркин В.И., Хахинов В.В. О возбуждении сферического волновода Земля — ионосфера произвольным распределением тока // Иссл. по геомагнетизму, аэронауки и физике Солнца. 1984. Вып. 69. С. 16–22.
- Куркин В.И., Орлов И.И., Попов В.Н. Метод нормальных волн в проблеме коротковолновой радиосвязи. М.: Наука, 1981. 121 с.
- Куркин В.И., Ильин Н.В., Пензин М.С. и др. Расчет характеристик нормальных волн в декаметровом волноводе Земля — ионосфера. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017613880 от 03.04.2017 г.
- Лавров Г.А., Князев А.С. Приземные и подземные антенны. М.: Наука, 1965. 472 с.
- Леонтович М.А. Избранные труды. Теоретическая физика. М.: Наука, 1985. 432 с.
- Пономарчук С.Н., Ильин Н.В., Пензин М.С. Модель распространения радиоволн в диапазоне частот 1–10 МГц на основе метода нормальных волн // Солнечно-земная физика. 2014. Вып. 25. С. 33–39.
- Попов В.Н., Потехин А.П. Структура поля импульсного сигнала декаметрового диапазона в волноводе Земля — ионосфера // Иссл. по геомагнетизму, аэронауки и физике Солнца. М.: Наука, 1982. Вып. 59. С. 68–76.
- Фейнберг Е.Л. Распространение радиоволн вдоль земной поверхности. М.: Изд-во АН СССР, 1961. 548 с.
- Хахинов В.В. Расчет тока в приемной антенне в КВ-поле, заданном рядом нормальных волн // Иссл. по геомагнетизму, аэронауки и физике Солнца. 2000. Вып. 111. С. 74–83.
- Bremmer H. Terrestrial Radio Waves. Theory of Propagation. Amsterdam, 1949. 343 p.
- Khakhinov V.V. Analyzing the HF field in the wave zone of the antenna using the normal-mode approach // Proc. VIII International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory. IEEE: Kharkov, Ukraine, 2000. P. 298–300.
- Khakhinov V.V. Electromagnetic model of the receiving antenna in terms of a waveguide representation of the HF field // Proc. IX International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory. IEEE: Kiev, Ukraine, 2002. V. 2. P. 617–619.
- Khakhinov V.V. The electrodynamic model of decameter radiochannel with isotropic receiving-transmitting antennas // Proc. X International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory. IEEE: 04EX840. Dnepropetrovsk, Ukraine, 2004. P. 372–374.
- Khakhinov V.V., Kurkin V.I. Waveguide approach to modeling of the ionosphere radiochannel // Proc. XI International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory. IEEE: 06EX1428, Kharkov, Ukraine, 2006. P. 284–286.

REFERENCES

- Aizenberg G.Z., Belousov S.P., Zhurbenko E.M., Kliger G.A., Kurashov A.G. *Korotkovolnovyye anteny* [Shortwave antennas]. Moscow, Radio i Svyaz Publ., 1985, 536 p. (In Russian).
- Altyntseva V.I., Ilyin N.V., Kurkin V.I., Orlov A.I., Orlov I.I., Polekh N.M., Ponomarchuk S.N., Khakhinov V.V. Modeling a

decimeter radiochannel based on normal-mode approach. *Tekhnika sredstv svyazi* [Technology of Communications Assets]. Ser. SS. Moscow, Ekos Publ., 1987, iss. 5, pp. 28–34. (In Russian).

Bremmer H. *Terrestrial Radio Waves. Theory of Propagation*. Amsterdam, 1949, 343 p.

Feinberg E.L. *Rasprostranenie radiovoln vdol zemnoi poverkhnosti* [Propagation of Radiowaves Along the Terrestrial Surface]. Moscow, USSR Academy of Sciences Publ., 1961, 548 p. (In Russian).

Khakhinov V.V. Calculation of current in receiving antenna in HF field generated by a series of normal modes. *Issledovaniya po geomagnetizmu, aeronomii i fizike Solntsa* [Res. on Geomagnetism, Aeronomy and Solar Physics]. 2000, iss. 111, pp. 74–83. (In Russian).

Khakhinov V.V. Analyzing the HF field in the wave zone of the antenna using the normal-mode approach. *Proc. VIII International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory*. IEEE: Kharkov, Ukraine, 2000, pp. 298–300.

Khakhinov V.V. Electromagnetic model of the receiving antenna in terms of a waveguide representation of the HF field. *Proc. IX International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory*. IEEE: Kiev, Ukraine, 2002, vol. 2, pp. 617–619.

Khakhinov V.V. The electrodynamic model of decimeter radiochannel with isotropic receiving-transmitting antennas. *Proc. X International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory*. IEEE: 04EX840. Dnepropetrovsk, Ukraine, 2004, pp. 372–374.

Khakhinov V.V., Kurkin V.I. Waveguide approach to modeling of the ionosphere radio channel. *Proc. of the XI International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory*. IEEE: 06EX1428, Kharkov, Ukraine, 2006, pp. 284–286.

Kurkin V.I., Khakhinov V.V. On excitation of a spherical Earth — ionosphere waveguide using arbitrary current distribution. *Issledovaniya po geomagnetizmu, aeronomii i fizike Solntsa* [Res. on Geomagnetism, Aeronomy and Solar Physics]. 1984, iss. 69, pp. 16–22. (In Russian).

Kurkin V.I., Orlov I.I., Popov V.N. Metod normalnykh voln v problem korotkovolnovoi radiosvyazi [Normal-Mode Approach in the Problem of HF Radio Communication]. Moscow, Nauka Publ., 1981, 121 p. (In Russian).

Kurkin V.I., Ilyin N.V., Penzin M.S., Ponomarchuk S.N., Potekhin A.P., Khakhinov V.V. *Calculation of characteristics of normal modes in a decimeter Earth — ionosphere waveguide: Certificate of Computer Program State Registration No. 2017613880 of 03.04.2017*. (In Russian).

Lavrov G.A., Knyazev A.S. *Prizemnye i podzemnye anteny* [Near-Surface and Subsurface Antennas]. Moscow, Nauka Publ., 1965, 472 p. (In Russian).

Leontovich M.A. *Izbrannye trudy. Teoreticheskaya Fizika* [Selected Works. Theoretical Physics]. Moscow, Nauka Publ., 1985, 432 p. (In Russian).

Ponomarchuk S.N., Ilyin N.V., Penzin M.S. The model of radio wave propagation in 1–10 MHz frequency range on the base of normal wave technique. *Solnechno-zemnaya fizika* [Solar-Terrestrial Physics]. 2014, iss. 25, pp. 33–39. (In Russian).

Popov V.N., Potekhin A.P. Field structure of a pulse decimeter signal in the Earth-ionosphere waveguide. *Issledovaniya po geomagnetizmu, aeronomii i fizike Solntsa* [Res. on Geomagnetism, Aeronomy and Solar Physics]. 1982, iss. 59, pp. 68–76. (In Russian).

Vainshtein L.A. *Elektromagnitnye volny* [Electromagnetic Waves]. Moscow, Radio i Svyaz Publ., 1988, 440 p. (In Russian).

Как цитировать эту статью

Хахинов В.В. Электродинамическая модель приемной антенны в рамках волнового представления КВ-поля. *Солнечно-земная физика*. 2018. Т. 4, № 3. С. 114–118. DOI: [10.12737/szf-43201812](https://doi.org/10.12737/szf-43201812).