УДК 621.371.3+537.87 DOI: 10.26907/rwp29.2025.270-273

КОМПЛЕКСНЫЙ АЛГОРИТМ МОДЕЛИРОВАНИЯ КОРОТКОВОЛНОВЫХ РАДИОТРАСС

С.Н. Пономарчук, В.И. Куркин, Н.В. Ильин, В.П. Грозов, М.С. Пензин, В.В. Хахинов

Институт солнечно-земной физики СО РАН, 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 126А
E-mail: spon@iszf.irk.ru, kurkin@iszf.irk.ru, ilyin@iszf.irk.ru, grozov@iszf.irk.ru, penzin@iszf.irk.ru, khakhin@iszf.irk.ru

Аннотация. Разработан и реализован комплексный алгоритм моделирования коротковолновых (КВ) радиотрасс, включающий модель среды, алгоритмы расчета характеристик сигналов и автоматической интерпретации ионограмм. Расчет характеристик КВ сигналов проводится в рамках волноводного подхода – метода нормальных волн, с использованием высотных профилей электронной концентрации и эффективной частоты соударений электронов, электрических параметров постилающей поверхности в заданных точках вдоль радиотрассы. Рассчитываются дистанционно-частотные, частотно-угловые и амплитудные характеристики КВ сигналов с учетом приемных и передающих антенно-фидерных устройств. В комплексном алгоритме сняты ограничения на нижние границы частотного диапазона и длины радиотрассы, что позволяет моделировать характеристики КВ сигналов как для коротких, так и сверхдлинных радиотрасс.

Ключевые слова: распространение радиоволн; волноводный подход; прогнозирование радиотрасс; ионограмма; диагностика радиоканала

COMPREHENSIVE ALGORITHM FOR MODELING HF RADIO PATHS

S.N. Ponomarchuk, V.I. Kurkin, N.V. Ilyin, V.P. Grozov, M.S. Penzin, V.V. Khakhinov

Abstract. We developed and implemented a comprehensive algorithm for modeling HF radio paths, which includes a medium model, algorithms for calculation of signal characteristics and automatic interpretation of ionograms. Characteristics of HF signals are calculated within the waveguide approach – the normal mode technique, using height profiles of electron density and effective frequency of electron collisions, the electrical parameters of the underlying surface in specified points along the radio path. The distance-frequency, frequency-angular, and amplitude characteristics of HF signals are calculated taking receiving and transmitting antenna feeders into account. Restrictions on the frequency range lower limits and the radio path length are eliminated in this comprehensive algorithm, which makes it possible to simulate HF signal characteristics for both short and ultra-long radio paths.

Keywords: radio wave propagation; waveguide approach; radio paths forecast; ionogram; radio channel diagnostics

Введение

Одним из эффективных методов описания процесса распространения КВ радиосигналов является волноводный подход – метод нормальных волн [1]. В рамках подхода построена модель КВ радиоканала, включающая передающее и приемное устройства, антенно – фидерные системы, волновод Земля – ионосфера [2]. Получено представление передаточной функции радиоканала в виде ряда произведений функций Грина углового оператора, коэффициентов возбуждения, коэффициентов приема отдельных нормальных волн для ТМ – и ТЕ – полей. Модифицирована схема решения радиальной задачи и построения спектра радиального оператора с учетом поглощения поля сигнала в ионосфере и земной поверхности. Это позволяет проводить моделирование КВ радиоканала в частотном диапазоне, включающем значения ниже критической частоты F2 – слоя ионосферы, и без ограничения на длину радиотрассы. На основе анализа и численного суммирования ряда нормальных волн разработаны алгоритмы расчета дистанционно-частотных (ДЧХ), частотно-угловых (УЧХ) и амплитудных характеристик сигналов, включая развертку сигнала [3]. Расчет характеристик радиосигналов проводится для различных типов модуляции излучаемого сигнала с учетом обработки сигнала в приемном устройстве. В докладе представлены комплексный алгоритм моделирования КВ радиотрасс и результаты интерпретации экспериментальных данных наклонного зондирования (НЗ) ионосферы на трассах различной протяженности и ориентации.

Цель работы

Разработка и реализация комплексного алгоритма на основе волноводного подхода для решения задач распространения радиоволн КВ-диапазона на радиотрассах.

Решаемые задачи

Моделирование характеристик распространения КВ-сигналов на трассах различной протяженности, включая слабонаклонные и сверхдлинные.

Модель распространения радиоволн

Выражение для регистрируемого сигнала в приемнике, расположенного в точке $\boldsymbol{r} = (r, \theta, \varphi_F)$, можно записать в виде ряда произведений функций Грина углового оператора, коэффициентов возбуждения, коэффициентов приема отдельных нормальных волн [2,3]:

$$u_a(\boldsymbol{r}, t) = Re \sum_{n=n_1}^{n=n_m} \left[a_n(\boldsymbol{r}, \omega_0) g_0(t - \tau_n(\theta)) e^{i\Psi_n(\theta, \omega_0)} \right] e^{-i\omega_0 t}. \quad (1)$$

Здесь $a_n(\boldsymbol{r}, \omega_0) = A_n \left[\tilde{D}_n^e(\varphi) \tilde{P}_n^e(\varphi_F) + \tilde{D}_n^m(\varphi) \tilde{P}_n^m(\varphi_F) \right] e^{-\Gamma_n(\theta)}$ – амплитудный множитель нормальной волны, $g_0(t)$ - огибающая излученного импульса, $\tau_n(\theta)$ - задержка нормальной волны на заданную дальность θ, $\Psi_n(\theta, \omega_0) = ka \int_0^\theta \gamma_n(\theta') d\theta'$ – фаза волны, $k = \omega_0 / c$, a – радиус Земли, $\Gamma_n(\theta) = ka \int_0^\theta [(\nu_n^e + \nu_n^m)/2] d\theta'$ – затухание нормальной волны, γ_n и $\nu_n^{e,m}$ – вещественная и мнимая части спектрального параметра $\tilde{\gamma}_n^{e,m}$. Предполагается, что полярная ось сферической системы координат проходит через точку расположения излучателя. Выражение (1) записано в адиабатическом приближении, в предположении плавного изменения параметров ионосферы в зависимости от угловой координаты θ. В этом приближении номер нормальной волны *n* является адиабатическим инвариантом и в каждой точке радиотрассы можно использовать решения радиальной задачи для сферически-симметричной модели волновода Земля – ионосфера с соответствующими параметрами среды для определения собственных значений $(\tilde{\gamma}_n^{e,m})^2$ и собственных функций $R_n^{e,m}(r, \theta)$. Поэтому можно считать, что спектральный параметр $\tilde{\gamma}_n^{e,m}(\theta)$ является функцией угловой координаты θ. Характеристики нормальной волны $\Psi_n(\theta, \omega_0), \tau_n(\theta)$ и $\Gamma_n(\theta)$ определяются интегральными функциями от угловой координаты θ и зависят от свойств среды распространения.

В амплитудные множители нормальных волн, наряду с коэффициентами поглощения в ионосфере и земной поверхности, определяемые $\Gamma_n(\theta)$, входят коэффициенты возбуждения $\tilde{D}_n^{e,m}$ и приема $\tilde{P}_n^{e,m}$ нормальных волн ТМ и ТЕ – типов, которые рассчитываются для заданных антенно-фидерных устройств [2]. Отметим также, что выражение для регистрируемого сигнала (1) получено в изотропном волноводе Земля – ионосфера без учета геомагнитного поля, поэтому вид поляризации волны не фиксируется.

Пределы суммирования в (1) выбираются из условий эффективного возбуждения нормальных волн (n_1) и малого затухания волн за счет поглощения или просачивания волн сквозь ионосферу (n_m) [1]. Номера n_1 и n_m вычисляются, используя уравнение спектра нормальных волн, исходя из граничных значений вещественной части собственного значения радиальной задачи $\xi_n = \gamma_n^2 - \nu_n^2$, определяющих группу нормальных волн, формирующих поле сигнала в волноводе [2]. Граничные значения ξ_n находятся из равенства, определяющего особые точки ВКБ – решения для собственных функций радиального оператора – точки поворота (отражения):

$$\xi_n = (r/a)^2 \left[1 - (f_e / f)^2 \right], \quad (2)$$

где $f_e = \sqrt{80.6 N_e(r)}$ - плазменная частота, $N_e(r)$ [м$^{-3}$] – профиль электронной концентрации. Локальные минимумы и точки перегиба функции ξ_n для фиксированной угловой координаты θ определяют значения параметров ξ^j_{min} и ξ^j_{max}, где *j=1,2,3* для волноводного канала, образованного земной поверхностью и слоем *E, F1* или *F2* соответственно. Используя уравнение спектра нормальных волн, по значениям ξ^j_{max} и ξ^j_{min} рассчитываются соответствующие нижние и верхние граничные номера в волноводном канале: n^j_1 и n^j_m. В реализованном алгоритме расчета характеристик КВ сигналов учитываются только те группы нормальных волн, которые распространяются в волноводных каналах, существующих в пределах всей радиотрассы, без переходов и просачивания. Таким образом, полная группа нормальных волн, формирующая ток в приемной антенны, есть объединение групп нормальных волн, распространяющихся в волноводных *E, F1* и *F2* – каналах. Нижней границей является номер, определяемый из условий возбуждения и приема нормальных волн: $\tilde{n}_1 = max[n_1(0), n_1(\theta)]$. Номер n_1 вычисляется при $\gamma_n = b/a$, где b – радиальная координата расположения излучателя или приемника. За верхнюю границу номера для полной группы нормальных волн, формирующих поле сигнала в точке приема, можно выбрать номер $n_0 = min\, n^3_m(\theta_1)$, где $0 < \theta_1 < \theta$.

Поле отдельной нормальной волны распределено по всему сечению волновода и зависит от его глобальных характеристик, суммарное же поле локализовано вблизи траектории распространения КВ сигнала, где выполнено условие сфазированности отдельных групп волн (условие стационарности), которое имеет вид:

$$\Delta\Psi_n(\boldsymbol{r}, \omega_0) = \frac{1}{2\pi}(\Psi_n - \Psi_{n+1}) = l\,, \tag{3}$$

где l – целое число. Угол выхода траектории ϕ_1 из точки излучения b связан со спектральным параметром центральной волны группы сфазированных волн с номером n_i, соотношением: $cos\,\phi_1 = a\gamma_{n_i}(0)/b$. Тогда число *l* есть число отражений траектории сигнала от ионосферы.

Выражения (1) и (3) служат формульной основой схемы расчета распределения поля КВ сигнала в волноводе по методу нормальных волн. Решение уравнения (3) относительно номера n_i позволяет для каждого из волноводных каналов *E*, *F1* и *F2* определить модовую структуру сигнала (количество сигналов и их идентификацию) и рассчитать МПЧ, временные и угловые характеристики сигналов для модов распространения. Номер n_i связан с углом прихода траектории ϕ_2 в точку приема соотношением: $cos\,\phi_2 = a\gamma_{n_i}(\theta)/r$. Таким образом, рассчитывается частотно-угловая характеристика регистрируемых сигналов в точке приема. Амплитудные характеристики КВ сигналов рассчитываются на основе прямого численного суммирования рада нормальных волн [3].

Результаты моделирования

Для моделирования характеристик КВ радиосигналов и диагностики радиоканала был реализован программный комплекс, включающий модели ионосферы [4, 5] и электрических свойств подстилающей поверхности [6], базу данных передающих и приемных антенн и модули расчета характеристик сигналов. Для анализа экспериментальных ионограмм, определения максимальных применимых частот (МПЧ) модов распространения на радиотрассе используется методика автоматической обработки и интерпретации ионограмм наклонного зондирования [7]. Вычисления характеристик радиосигналов проводятся с использованием «комплексной арифметики». Верификация алгоритма проводилась по экспериментальным данным наклонного зондирования ионосферы непрерывным ЛЧМ – сигналом на радиотрассах в различных гелиогеофизических условиях. Алгоритм интерпретации ионограмм НЗ показал высокую эффективность и точность определения МПЧ модов распространения при анализе больших массивов экспериментальных данных.

В качестве иллюстрации на рис. 1 приведены экспериментальные ионограммы и результаты моделирования дистанционных характеристик распространения для двух

предельных случаев ЛЧМ – зондирования КВ радиоканала: вертикального и кругосветного. В первом случае, расчет высотно – частотной характеристики $h'(f)$ проводился по профилю плазменной частоты $f_e(h)$ (бордовая линия на рис.1), восстановленного из реальной ионограммы вертикального зондирования (черные точки). Во втором, расчет ДЧХ кругосветных сигналов проводился с использованием полуэмпирической модели ИГУ [4]. Минимальное число отражений от слоя F2 кругосветного сигнала равно 17, при этом основной сигнал на ионограмме формировался сигналами с 18 – кратными отражениями от слоя.

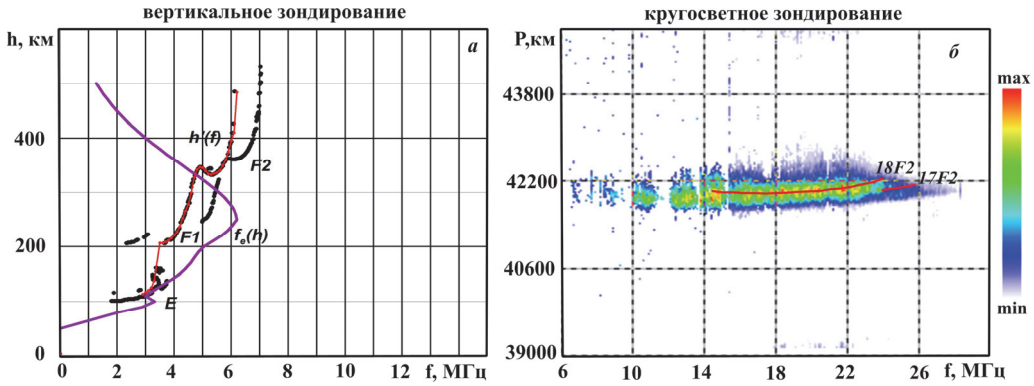

Рис. 1. Ионограммы зондирования и результаты моделирования: (*а*) – высотно – частотной характеристики *h'(f)* (красная линия) и (*б*) – группового пути распространения кругосветных сигналов (красные линии)

Заключение

Реализован комплексный алгоритм моделирования КВ радиотрасс, включающий модель среды, алгоритмы расчета характеристик сигналов и автоматической интерпретации ионограмм. Результаты работы комплексного алгоритма могут быть использованы для определения диапазонов оптимальных рабочих частот и для адаптации радиосистем к условиям распространения.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (субсидия №075-ГЗ/Ц3569/278). Экспериментальные данные получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Ангара» http://ckp-rf.ru/ckp/3056/.

Список литературы

1. Куркин В.И., Орлов И.И., Попов В.Н. Метод нормальных волн в проблеме коротковолновой радиосвязи. – М.: Наука, 1981. – 121 с.
2. Куркин В.И., Ильин Н.В., Пензин М.С., Пономарчук С.Н., Хахинов В.В. Моделирование КВ-радиоканала на основе волноводного подхода // Солнечно-земная физика. – 2023. – Т. 9. – № 4. – С. 91–103.
3. Пономарчук С.Н., Ильин Н.В., Куркин В.И., Пензин М.С. Применение волноводного подхода для исследования коротковолновых радиотрасс // Радиотехника и электроника. – 2024. – Т. 69. – № 6. – С. 513–523.
4. Поляков В.М., Суходольская В.Е., Ивельская М.К. Полуэмпирическая модель ионосферы // Материалы мирового центра данных Б. – М.: МГК АН СССР, 1986. – 112 с.
5. Bilitza, D., Altadill D. et al. International Reference Ionosphere 2016: From ionospheric climate to real-time weather predictions //Space Weather. – 2017. – Vol. 15. – No. 2. – P. 418–429.
6. Пономарчук С.Н. Модель электрических свойств земной поверхности в КВ диапазоне // Исследования по геомагнетизму, аэрономии и физике Солнца. – М.: Наука. 1984. – Вып. 69. – С. 42–47.
7. Пономарчук С.Н., Грозов В.П. Автоматическая интерпретация ионограмм наклонного зондирования на основе гибридных алгоритмов // Солнечно-земная физика. – 2024. – Т. 10. – № 2. – С. 109–118.