

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА И РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН

УДК 621.371.3+537.87

ПРИМЕНЕНИЕ ВОЛНОВОДНОГО ПОДХОДА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КОРОТКОВОЛНОВЫХ РАДИОТРАСС¹

© 2024 г. С. Н. Пономарчук*, Н. В. Ильин, В. И. Куркин, М. С. Пензин

^aИнститут солнечно-земной физики СО РАН,
ул. Лермонтова, 126а, Иркутск, 664033 Российская Федерация

*E-mail: spon@iszf.irk.ru

Поступила в редакцию 28.10.2023 г.

После доработки 15.04. 2024 г.

Принята к публикации 25.04.2024 г.

Развит метод моделирования коротковолновых (КВ) радиотрасс на основе волноводного подхода — метода нормальных волн. Разработана схема решения радиальной задачи и построения спектра радиального оператора применительно к низкочастотной части декаметрового диапазона. Разработаны алгоритмы расчета дистанционно-частотных, частотно-угловых и амплитудных характеристик сигналов в больших пространственных областях на основе анализа и численного суммирования ряда нормальных волн. Реализован комплексный алгоритм для исследования КВ-радиотрасс, включающий модель среды, алгоритмы расчета характеристик сигналов и оперативной диагностики радиоканала.

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

DOI: 10.31857/S0033849424060028, **EDN:** IKJPRH

ВВЕДЕНИЕ

Интенсивное развитие спутниковых средств связи не отменяет широкое применение декаметрового диапазона частот при создании различных радиотехнических систем, благодаря его возможности обеспечить условия связи в больших пространственных областях. Для повышения надежности и качества связи при функционировании таких систем, включая когнитивное радио, используются данные активного и пассивного зондирования ионосферы [1, 2]. При использовании наклонного зондирования (НЗ) для адаптации параметров радиосистем, в частности для определения диапазона рабочих частот, необходимо оперативное прогнозирование характеристик распространения, на основе которого проводится интерпретация результатов зондирования на выбранной сети коротковолновых (КВ) радиотрасс. Выделение частотных зависимостей групповых задержек модов распространения на регистрируемых ионограммах позволяет оценить дисперсионные искажения сигнала в радиоканале для дальнейшего их устранения с использованием согласованной обработки радиосигналов в приемном устройстве [3, 4].

Существующие методы моделирования КВ-радиотрасс в основном базируются на методе геометрической оптики [5–12]. Разработанные методы расчета позволяют провести траекторный синтез распределения поля по пространству и оценить амплитуду поля сигналов. Для более полного описания процесса распространения радиоволн в неоднородных магнитоактивных средах с учетом особенностей в области каустик применяются методы канонического оператора Маслова и теории катастроф [13–15]. Влияние случайных неоднородностей различных масштабов исследовалось на основе метода интерференционного интеграла [16] и обобщенного метода Рытова [17], а также метода параболического уравнения [18,19]. Метод адиабатического инварианта [20] и его обобщение на основе асимптотических решений лучевых уравнений [21] повысили оперативность анализа дальних радиотрасс. Для исследования распространения радиосигналов в диспергирующих средах был развит метод пространственно-временной геометрической теории дифракции [22].

Одним из эффективных методов исследования КВ-радиотрасс является волноводный подход — метод нормальных волн, первоначально развитый для анализа распространения радиоволн на больших и сверхбольших расстояниях от передатчика [23–25]. Этот метод является одним из основных в диапазоне сверхдлинных волн [26, 27]

¹ Работа была доложена на XXVIII Всероссийской открытой научной конференции «Распространение радиоволн» (23–26 мая 2023 г., Йошкар-Ола).

и в подводной акустике [28–29]. В рамках волнового подхода электромагнитное поле излучения внутри сферического волновода Земля–ионосфера представляется в виде разложения по собственным функциям радиальной краевой задачи. Получающийся при этом ряд нормальных волн для декаметрового диапазона содержит $\sim 10^3 \dots 10^4$ слагаемых, что затрудняло его практическое применение для исследования КВ-радиотрасс.

В дальнейшем были разработаны методы численного и аналитического суммирования ряда нормальных волн [30, 31], которые позволили реализовать эффективные схемы расчета основных характеристик КВ-сигналов, методики диагностики и прогноза радиотрасс. При этом для численных расчетов ряд ограничивался так называемой группой слабозатухающих нормальных волн. Если несущая частота сигнала больше минимальной критической частоты на трассе распространения, то в каждой точке волновода существует номер нормальной волны, начиная с которого поле волны перестает отражаться от ионосферы. В случае если частота меньше критических частот по трассе, группа слабо просачивающихся волн становится бесконечной. При этом реальные части спектрального параметра радиальной задачи образуют последовательность, сходящуюся к нулю, что физически соответствует наличию углов излучения, сколь угодно близких к вертикали к земной поверхности. Мнимые части спектрального параметра растут с увеличением номеров, но обусловлено это не прохождением волн сквозь ионосферный барьер, а поглощением в ионосфере.

Цель данной работы – развитие метода нормальных волн для многомодового волновода для более корректного учета затухания поля в среде и обоснование целесообразности его применения для решения задач моделирования распространения радиоволн КВ-диапазона на основе сопоставления результатов расчета характеристик радиосигналов и экспериментальных данных наклонного зондирования на трассах различной протяженности.

Для этого модифицирована схема решения радиальной задачи и построения спектра радиального оператора для частот нижней части декаметрового диапазона, для которых существует регулярный волновод Земля–ионосфера и число нормальных волн достаточно велико. На основе общей схемы решения радиальной задачи были разработаны численные алгоритмы расчета характеристик сигналов для всего декаметрового диапазона без ограничения на протяженность радиотрассы. Результаты моделирования дистанционно-частотных характеристик (ДЧХ) сигналов используются в алгоритме автоматической интерпретации ионограмм наклонного зондирования на радиотрассе для определения максимальных

применимых частот и построения треков отдельных модов распространения [32].

1. МЕТОД НОРМАЛЬНЫХ ВОЛН

Для практического применения метода нормальных волн для исследования КВ-радиотрасс представим поле внутри волновода Земля–ионосфера в виде ряда по собственным функциям радиальной краевой задачи с импедансными условиями на земной поверхности и условиями излучения на бесконечности [25]. Расчетные выражения для компонент электромагнитного падающего поля для точки $\vec{r}$ в изотропном волноводе Земля–ионосфера запишем в виде [33]

$$E(\vec{r}) = j_T U(\omega) \sum_n A_n R_n(\vec{r}) D_n(\vec{j}, \varphi) \exp(ih \int_0^\theta (\gamma_n + i\nu_n) d\theta') \quad (1)$$

Здесь $\vec{r} = (r, \theta, \varphi)$ – радиус-вектор точки, в которой вычисляется поле, $h = ka$ ($k = \omega/c$, a – радиус Земли), $U(\omega)$ – спектр входного сигнала, j_T – входной ток в передающей антенне, A_n – амплитудный коэффициент, R_n и $\xi_n + i\chi_n = (\gamma_n + i\nu_n)^2$ – собственные функции и собственные значения радиальной граничной задачи, $D_n(\vec{j}, \varphi)$ – коэффициенты, характеризующие уровень возбуждения нормальных волн антенной с заданным распределением тока $\vec{j}$. Коэффициенты возбуждения нормальных волн $D_n(\vec{j}, \varphi)$ являются интегралами по объему, занятому источником поля, и являются аналогами диаграмм направленности излучающих антенн [34, 35]. 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 [25]. В этом приближении номер нормальной волны n является адиабатическим инвариантом, и поэтому в каждой точке радиотрассы можно использовать решение радиальной задачи для сферически-симметричной модели волновода Земля–ионосфера с соответствующими параметрами среды для определения собственных значений $(\gamma_n + i\nu_n)^2$ и собственных функций $R_n(r)$. Поэтому можно считать, что спектральный параметр $\gamma_n + i\nu_n$ является функцией угловой координаты θ .

Радиальное уравнение краевой задачи имеет вид [36]

$$\frac{d^2 R_n}{dy^2} + h^2 Q(y, \xi_n + i\chi_n) R_n = 0, \quad (2)$$

где

$$Q = 1 - f_e^2 / f^2 + i\rho_{\text{эф}} f_e^2 / f^3 - (\xi_n + i\chi_n) / y^2,$$

$y = r / a$, $f_e^2 = 4\pi e^2 N(y) / m$ — квадрат плазменной частоты, $\rho_{эф}$ — частота соударений электронов с нейтралами. В отличие от ранее развитого подхода [25], в коэффициенте радиального уравнения $Q(y, \xi_n + i\chi_n)$ учтена мнимая часть комплексной диэлектрической проницаемости ионосферной плазмы, а также комплексность собственного значения радиальной задачи. Поэтому вещественную независимую переменную y можно рассматривать как комплексную переменную z . Решение радиального уравнения (2) записывается в виде ВКБ-приближения [37], так как параметр $h = ka \sim 10^6$. Нули функции $Q(z, \xi_n + i\chi_n)$ определяют точки отражения (поворота). Для волновода Земля—ионосфера с однослойной ионосферой нижней точкой отражения является поверхность Земли или точка

$$z_1 = \sqrt{\xi_n + i\chi_n} = \gamma_n + i\nu_n.$$

В окрестности верхней точки отражения z_2 меняет знак $\text{Re} Q(z, \xi_n + i\chi_n)$, поэтому из условия $\text{Re} Q(z, \xi_n + i\chi_n) = 0$ можно приближенно записать выражение на вещественную часть $\xi_n = \gamma_n^2 - \nu_n^2$:

$$\xi_n = y^2 (1 - f_e^2 / f^2). \quad (3)$$

Равенство (3) для заданной частоты f определяет условие существования волновода Земля—ионосфера и группу слабозатухающих нормальных волн, формирующих электромагнитное поле сигнала. Собственные значения $\xi_n + i\chi_n$ радиальной задачи в комплексной плоскости (ξ, χ) расположены в верхней полуплоскости, так как $\xi_n = \gamma_n^2 - \nu_n^2$, $\chi = 2\gamma_n \nu_n$. В комплексной же плоскости (γ, ν) значения спектрального параметра $\gamma_n + i\nu_n = \sqrt{\xi_n + i\chi_n}$ расположены в верхнем правом квадранте. В области рабочих частот, меньших критической частоты слоя, вещественная часть спектрального параметра γ_n стремится к нулю с увеличением номера нормальной волны, а мнимая часть ν_n резко возрастает. При этом для определенной части спектра существует регулярный волновод Земля—ионосфера и число нормальных волн достаточно велико.

Решение радиального уравнения вне окрестностей точек поворота z_1, z_2 в виде ВКБ-приближения имеет вид [37]

$$R_n = \frac{C_n^\pm}{\sqrt{Q}} \exp \left(\pm i h \int_{z_1}^z \sqrt{Q} dz \right), \quad (4)$$

где $C_n^\pm$ — произвольные константы. В области точек поворота z_1, z_2 решение уравнения (2) строим, используя эталонное уравнение Эйри [25, 38]. Вблизи поверхности Земли в окрестности точки $z_1 = \gamma_n + i\nu_n$ решение выражается в виде линейной комбинации функций Эйри $u(x)$ и $v(x)$ [38]

и с учетом импедансных граничных условий может быть преобразовано к виду ВКБ-решения [25, 36]:

$$R_n = \frac{C_{1n}}{Q^{1/4}} \cos \left(h \int_{z_1}^y \sqrt{Q} dy + \Phi_n \right), \quad (5)$$

где Φ_n — добавка к фазе нормальной волны, связанная с коэффициентом отражения волны от поверхности Земли.

Для точки поворота в ионосфере решение (2) ищем, используя эталонное уравнение Эйри и выбирая только убывающее решение “вглубь ионосферы” [25]. Асимптотика решения в волноводе имеет вид

$$R_n = \frac{C_{2n}}{Q^{1/4}} \sin \left(h \int_y^{z_2} \sqrt{Q} dy + \frac{\pi}{4} \right). \quad (6)$$

Из условия совпадения решений (5) и (6) внутри волновода, получаем уравнение на спектр собственных значений $\xi_n + i\chi_n$ радиальной задачи и связь между константами C_{1n} и C_{2n} :

$$h \int_{z_1}^{z_2} \sqrt{Q(z, \xi_n + i\chi_n)} dz + \Phi_n(\xi_n + i\chi_n) = \frac{\pi}{4} + \pi n, \quad (7)$$

$$(-1)^n C_{1n} = C_{2n}. \quad (8)$$

Разделяя (7) на реальную и мнимую части и пренебрегая малыми величинами второго порядка при разложении $\sqrt{Q}$ и Φ_n по мнимым частям диэлектрической проницаемости ионосферы и собственного значения радиальной задачи χ_n , получим уравнения для определения ξ_n и χ_n :

$$h \int_{y_1}^{y_2} \sqrt{Q(y, \xi_n)} dy + \text{Re} \Phi_n(\xi_n) = \frac{\pi}{4} + \pi n, \quad (9)$$

$$\chi_n = \frac{h \int_{y_1}^{y_2} \frac{\rho_{эф} f_e^2}{2f^3 \sqrt{Q(y, \xi_n)}} dy + \text{Im} \Phi_n(\xi_n)}{h \int_{y_1}^{y_2} \frac{1}{2y^2 \sqrt{Q(y, \xi_n)}} dy - \text{Re} \left[\frac{\partial \Phi_n(\xi_n)}{\partial \xi} \right]}. \quad (10)$$

Значение константы C_{1n} находим из условия нормировки радиальных функций [25].

2. МОДЕЛЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН

Рассмотрим численную схему моделирования характеристик КВ-радиотрасс на примере зондирующего импульсного сигнала. Выражение для регистрируемого сигнала на входе приемника можно записать в виде [25]

$$u_a(\vec{r}, t) = \text{Re} [w(\vec{r}, t) \exp(i\gamma(\vec{r}, t))] = \\ = \text{Re} \sum_{n=n_1}^{n=n_m} [a_n(\vec{r}) g_0(t - \tau_n(\theta)) \exp(i\Psi_n(\theta))] \exp(-i\omega t), \quad (11)$$

где $g_0(t)$ — огибающая излученного импульса, τ_n — задержка нормальной волны на заданную дальность θ , $a_n(\vec{r})$ — амплитудный множитель нормальной волны,

$$\Psi_n(\theta) = h \int_0^\theta \gamma_n(\theta') d\theta'$$

— фаза волны. В амплитудные множители нормальных волн входят наряду с коэффициентами поглощения в ионосфере и земной поверхности коэффициенты возбуждения и приема нормальных волн, которые рассчитываются для заданных антенно-фидерных устройств. Характеристики нормальной волны $\Psi_n(\theta)$, $\tau_n(\theta)$ и $a_n(\vec{r})$ определяются интегральными функциями от угловой координаты θ и зависят от свойств среды распространения. Пределы суммирования в (11) были выбраны из условий эффективного возбуждения нормальных волн (n_1) и малого затухания за счет поглощения или просачивания волн сквозь ионосферу (n_m) и рассчитаны с помощью уравнения на спектр нормальных волн (9). Граничные значения вещественной части собственного значения радиальной задачи ξ_1 и $\xi_{\min}$, соответствующие пределам суммирования n_1 и n_m , определены из выражения (3) из условия существования волновода Земля—ионосфера:

$$\text{Re} Q(z, \xi_n + i\chi_n) > 0.$$

Учет мнимой части диэлектрической проницаемости ионосферы и мнимой части собственного значения χ_n в коэффициенте радиальной задачи $Q(z, \xi_n + i\chi_n)$ позволил расширить частотный диапазон моделирования характеристик сигналов для анализа протяженных неоднородных КВ-радиотрасс — частота излучения может быть меньше критической частоты слоя F2 вдоль трассы распространения.

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

$$\Delta\Psi_n(\theta) = (\Psi_n - \Psi_{n+1}) = 2\pi l \quad (12)$$

(l — целое число). Угол выхода траектории Δ из точки излучения y_b связан со спектральным параметром центральной волны группы сфазированных волн с номером n_i соотношением $\cos \Delta = \gamma_{n_i} / y_b$ [25]. Тогда число l есть число отражений траектории распространения сигнала от ионосферы. В сферически-симметричном волноводе

уравнение стационарности можно свести к выражению для дальности скачка вдоль поверхности земли [39], используя связь угла места Δ со спектральным параметром γ_n :

$$D = 2a^2 \cos \Delta \int_a^{r_n} \frac{dr}{r \sqrt{\epsilon r^2 - a^2 \cos^2 \Delta}}. \quad (13)$$

Здесь r_n — точка отражения траектории в ионосфере.

Решение трансцендентного уравнения стационарности (12) относительно угловой дальности θ для заданных значений n_i позволяет построить аналог дальностно-угловой характеристики $D(\Delta)$ — зависимость $D(n_i) = a\theta(n_i)$. Вычисляя групповую задержку центральной волны n_i и используя $\theta(n_i)$, получим аналог дистанционно-угловой характеристики $P(\Delta)$ — зависимость $P(n_i)$ (P — групповой путь). Значения центральных номеров n_i переводим в углы выхода луча Δ_i , используя уравнения на спектр нормальных волн (9) и (10) для определения спектрального параметра γ_n . Для каждого из волноводных каналов E, F1 и F2 определяются отдельные зависимости $D(\Delta)$ и $P(\Delta)$. Для заданных значений частоты f и дальности D для каждого из каналов существует два решения уравнения стационарности (12) относительно угла выхода траектории из точки излучения, соответствующие нижнему и верхнему лучам [40]. С уменьшением дальности при фиксированной частоте f траектории распространения, соответствующие нижнему и верхнему лучам, сближаются и пересекаются в точке минимума в зависимости $D(\Delta)$. Точка минимума соответствует границе освещенной зоны D_m . Частота f для дальности D_m является максимальной применимой частотой (МПЧ) распространения f_m для сигнала, отраженного l раз от соответствующего слоя ионосферы. Для идентификации способа распространения сигналов с l отражениями от слоев ионосферы используется термин «мод распространения» — 1E, 1F1, 1F2, 2F2 и т.д. [41]. Минимум в зависимости $P(\Delta)$ определяет минимальный групповой путь P_m . Дальность до границы освещенной зоны D_m не совпадает с дальностью, на которой достигается минимум группового пути P_m . При увеличении рабочей частоты эта разность уменьшается. Расчет частотных зависимостей границы освещенной зоны $D_m(f)$ и минимального группового пути $P_m(f)$ был использован для анализа и интерпретации ионограмм возвратно-наклонного зондирования ионосферы непрерывным сигналом с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) [42].

Максимальные применимые частоты модов распространения и границы освещенной зоны вдоль земной поверхности для каждого из волноводных каналов E, F1 и F2 находим из уравнения

$$\max_{n \in [n_1, n_m]} \Delta\Psi_n(\theta, f) = 2\pi l. \quad (14)$$

Решение данного уравнения относительно f для фиксированного θ определяет МПЧ мода кратности l , а относительно θ для фиксированной частоты f — дальность до границы мертвой зоны l -го скачка.

Выражения (11), (12) и (14) служат формульной основой схемы расчета распределения поля декаметрового сигнала в волноводе по методу нормальных волн. На первом этапе в опорных по номеру n точках спектра рассчитываются характеристики нормальных волн $a_n, \Psi_n, \tau_n, \Delta\Psi_n$ по заданным профилям электронной концентрации $N(y)$ и эффективной частоты соударений $\rho_{\text{эф}}(y)$ в выбранных точках радиотрассы. Спектр нормальных волн $\xi_n + i\chi_n$ находим из решения трансцендентного уравнения (9) и уравнения (10). Затем определяются группы нормальных волн, формирующие поле сигнала в точке приема для волноводных каналов E, F1 и F2.

На втором этапе решение уравнения (12) относительно номера n позволяет для каждого из волноводных каналов E, F1 и F2 определить модовую структуру сигнала (количество сигналов и их идентификацию) и рассчитать временные и угловые характеристики сигналов для модов распространения. Используя уравнение (14), рассчитываем МПЧ модов распространения и границы освещенной зоны вдоль земной поверхности для каждого из волноводных каналов E, F1 и F2. Амплитудные характеристики сигналов рассчитываем с использованием формулы (11). Огибающую $w(\vec{r}, t)$ регистрируемого сигнала вычисляем на основе прямого численного суммирования выражений вида

$$w(\vec{r}, t) = \left[\sum_{n=n_1}^{n=n_m} a_n g_0(t - \tau_n) \cos \Psi_n \right]^2 + \left[\sum_{n=n_1}^{n=n_m} a_n g_0(t - \tau_n) \sin \Psi_n \right]^2 \quad (15)$$

Расчет огибающей сигнала $w(\vec{r}, t)$ позволяет исследовать форму принимаемого сигнала как для разделенных во времени импульсов, так и для перекрывающихся, т.е. как в освещенной зоне, так и в области каустики, где сливаются верхний и нижний лучи. Значение огибающей сигнала в центре импульса отдельного сигнала, соответствующего задержке $\tau_{n_i} + T/2$, можно принять за амплитуду сигнала, где T — длительность излученного импульса.

Развитая схема расчета характеристик импульсных сигналов применима и для расчета характеристик ЛЧМ-сигналов с учетом обработки методом сжатия по частоте [43]. В этом случае результат обработки отдельной временной выборки регистрируемого ЛЧМ-сигнала эквивалентен

прохождению через радиоканал “узкополосного импульсного” сигнала, характеристики которого определяются временным окном [44,45].

3. МЕТОДИКА ИНТЕРПРЕТАЦИИ ИОНОГРАММ

Для анализа экспериментальных данных, определения максимальных применимых частот и построения треков отдельных модов распространения был разработан метод автоматической интерпретации ионограмм наклонного зондирования [32]. В общем виде регистрируемая ионограмма НЗ — это матрица амплитуд, где каждый элемент $A(f_i, P_j)$ определяется двумя характеристиками: групповым путем (задержкой сигнала) P_j и частотой f_i . Интерпретация ионограмм НЗ была проведена с использованием результатов моделирования ДЧХ на заданной трассе в режиме долгосрочного прогноза, адиабатических инвариантов и результатов обработки экспериментальных данных. Применен алгоритм модельной маски. Основой метода являются адиабатические инварианты — величины, сохраняющиеся при вариациях параметров ионосферы в пределах погрешности долгосрочного прогноза (20%), а именно:

- отношение группового пути в точке смыкания нижнего и верхнего лучей мода распространения к длине радиотрассы (P_m / D);
 - отношение максимальных применимых частот модов различных кратностей (χ);
 - дистанционно-частотная характеристика одного мода на нормированной сетке частот $\beta = f / f_m$, где f_m — МПЧ мода для рассматриваемой дальности ($P(\beta)$).
- Данные адиабатические соотношения позволяют решить следующие вопросы диагностики декаметрового радиоканала по текущим данным регистрации ионограмм НЗ:
- интерпретация модов наклонного распространения на экспериментальных ионограммах по точкам со значимой амплитудой, полученных в результате вторичной обработки (соотношения для $\chi, P_m / D, P(\beta)$);
 - восстановление ДЧХ сигналов НЗ на заданной трассе, когда технические возможности ионозонда или условия на трассе не позволяют получить частотные зависимости группового пути какого-либо мода распространения (соотношения для χ и $P(\beta)$).

Интерпретация ионограмм НЗ проведена по следующей схеме. На первом этапе проводили вторичную обработку ионограмм для выделения массива точек $(f, P)_k, k = 1, M$, соответствующих моментам прихода сигналов со значимой амплитудой [32]. Далее была построена модельная маска по результатам долгосрочного прогноза ДЧХ НЗ на

радиотрассе. Модельная маска включает в себя две полосы шириной ΔP км (по вертикали), построенные вдоль нижнего и верхнего лучей на ДЧХ мода распространения. Алгоритм идентификации опорного мода, в качестве которого может быть выбран мод распространения в F2 канале минимальной кратности, на ионограмме заключается в подсчете числа точек со значимой амплитудой, попадающих в модельную маску при ее движении по ионограмме. Маску перемещали по ионограмме без поворотов, путем совмещения «носика» маски с точками со значимой амплитудой $(f, P)_k, k = 1, M$. Совмещение модельной маски и ионограммы осуществляли на нормированной сетке частот β , пересчитываемой на каждом шаге. При перемещении маски подсчитывали число точек N_k , попадающих в маску в пределах прямоугольников $[\Delta f \times \Delta P]$ с центром в каждой точке маски, где Δf и ΔP подбирали исходя из разрешения ионозонда по дальности и частоте. Значения частоты f_m^r и группового пути P_m^r , при которых достигается максимум числа точек, попадающих в маску, принимали за реальные МПЧ и групповой путь точки смыкания верхнего и нижнего лучей мода распространения. В случае определения f_m^r и P_m^r строили частотную зависимость группового пути $P(f)$ для интерпретированного мода распространения – масштабированную прогнозную ДЧХ. Для построения реального трека мода распространения из массива $(f, P)_k, k = 1, M$ выбирали точки, попадающие в полосы шириной ΔP вдоль модельной ДЧХ, относящейся к точке (f_m^r, P_m^r) и масштабированной по частоте множителем f_m^r / f_m^p . По аналогичному алгоритму проводили идентификацию других модов распространения, регистрируемых на радиотрассе.

Восстановление ДЧХ сигналов НЗ на заданной трассе, когда отсутствуют какие-либо стандартные моды распространения или возникают проблемы их идентификации в силу многолучевости и диффузности, проводили по следующей схеме. Были рассчитаны ДЧХ распространения по прогнозной модели ионосферы и прогнозное адипатическое отношение МПЧ модов различной кратности $\chi = f_l^p / f_{l\pm 1}^p$, где l – кратность мода,

присутствующего на ионограмме. Далее определяли экспериментальное значение МПЧ мода кратности l (f_l^r) и вычисляли значения $f_{l\pm 1}^r = f_l^r / \chi$. Определив реальные МПЧ и имея расчеты группового пути по прогнозным параметрам ионосферы на нормированной сетке частот $\beta = f / f_{l\pm 1}^p$, восстанавливали ДЧХ НЗ отсутствующих модов на текущий момент времени умножением β на $f_{l\pm 1}^r$.

4. АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Для исследования КВ-радиотрасс был реализован комплексный алгоритм, включающий модель среды, алгоритмы расчета характеристик сигналов и интерпретации ионограмм. Вычисления характеристик радиосигналов проводили с использованием «комплексной арифметики».

На рис. 1 приведены результаты расчетов частотных зависимостей групповых задержек, углов выхода и амплитуды сигналов A на среднеширотной трассе протяженностью 5600 км. Время расчета соответствовало 11^h UT, условия на трассе распространения соответствовали условиям «день-день». В качестве излучателя была использована фазированная антенная решетка, составленная из 13 пар вертикальных столбов, на каждом из которых расположено 8 пар горизонтальных магнитных диполей. Высота каждого столба равна 85 м, расстояние между парами диполей 10 м. Расчет коэффициентов возбуждения нормальных волн для частоты $f = 15$ МГц показал, что максимум излучения приходится на угол $\beta_m = 4^\circ$. С увеличением частоты максимальный угол β_m уменьшается и удовлетворяет соотношению $\beta_m = 60 / f$. Отношение второго максимума к главному не превышает –15 дБ. В качестве приемника был использован магнитный диполь. На рис. 1 приведены результаты расчетов характеристик распространения для двух- и трехскачковых сигналов, отраженных от слоя F2. МПЧ модов распространения 2F2 и 3F2 соответствуют 18.8 и 15.3 МГц.

Вычисление модового состава позволяет разобратся в сложной картине поведения поля сигнала

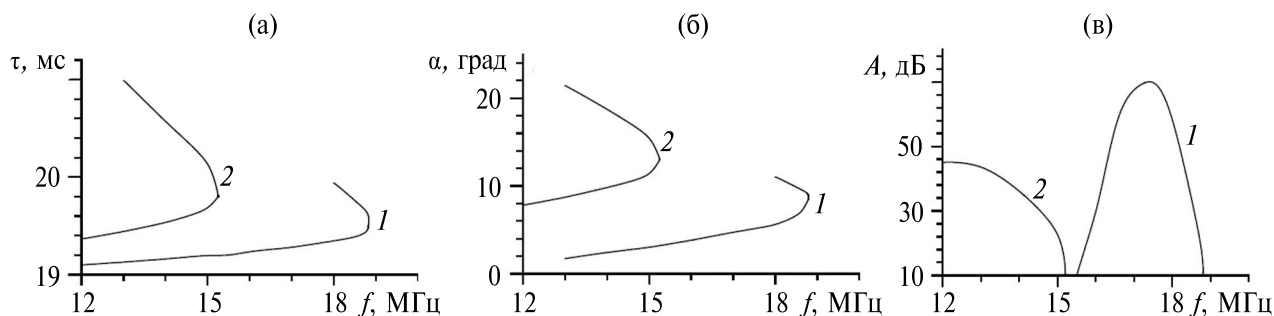


Рис. 1. Частотные зависимости задержки τ (а), угла выхода α (б) и амплитуды сигнала A (в) для двухскачковых (1) и трехскачковых сигналов (2).

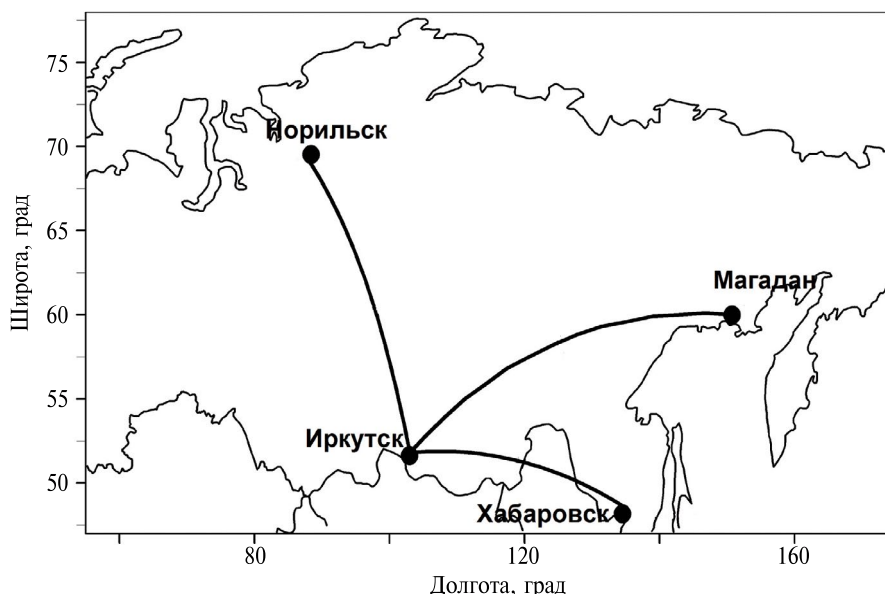


Рис. 2. Геометрия трасс НЗ в Северо-Восточном регионе России; передающие пункты: Магадан (60° с.ш., 150.7° в.д.), Хабаровск (47.6° с.ш., 134.7° в.д.), Норильск (69.4° с.ш., 88.4° в.д.), Иркутск (52.9° с.ш., 103.3° в.д.); приемные пункты: Иркутск (51.8° с.ш., 103° в.д.), Норильск (69.4° с.ш., 88.4° в.д.).

в точке приема и вычислить количественные характеристики отдельных импульсов. Результаты расчетов АЧХ по уровню 10 дБ приведены на рис. 1в. Амплитуда двухскачковых сигналов на 15...20 дБ больше амплитуды трехскачковых сигналов. В отличие от двухскачковых сигналов, амплитуда трехскачковых сигналов падает при увеличении рабочей частоты. Данная закономерность связана с частотной зависимостью угла выхода луча (рис. 1б). Для сигналов, распространяющихся по трехскачковым траекториям, углы выхода луча могут не попадать в растрouser углов диаграммы направленности решетки, поэтому эффект фокусировки сигналов вблизи МПЧ выражен слабо. По этой же причине в точке приема могут отсутствовать сигналы, соответствующие верхним лучам. При замене в расчетах излучающей антенной решетки элементарными диполями (магнитным или электрическим) амплитуда сигналов падает на 25...30 дБ для двухскачковых

сигналов и на 15...20 дБ для трехскачковых сигналов при одной и той же мощности передатчика.

Для проверки разработанных алгоритмов моделирования характеристик сигналов и интерпретации ионограмм привлекались данные, полученные на сети радиотрасс НЗ, охватывающей Северо-Восточный регион России и созданной на базе пространственно распределенного многофункционального ЛЧМ-ионозонда, разработанного в ИСЗФ СО РАН [46]. Геометрия расположения трасс приведена на рис. 2.

На основе решения трансцендентного уравнения (14) был реализован оперативный алгоритм расчета МПЧ модов распространения на КВ-радиотрассах. Верификация алгоритма в режиме прогноза МПЧ радиосвязи по экспериментальным максимальным наблюдаемым частотам (МНЧ) на сети радиотрасс НЗ в Северо-Восточном регионе

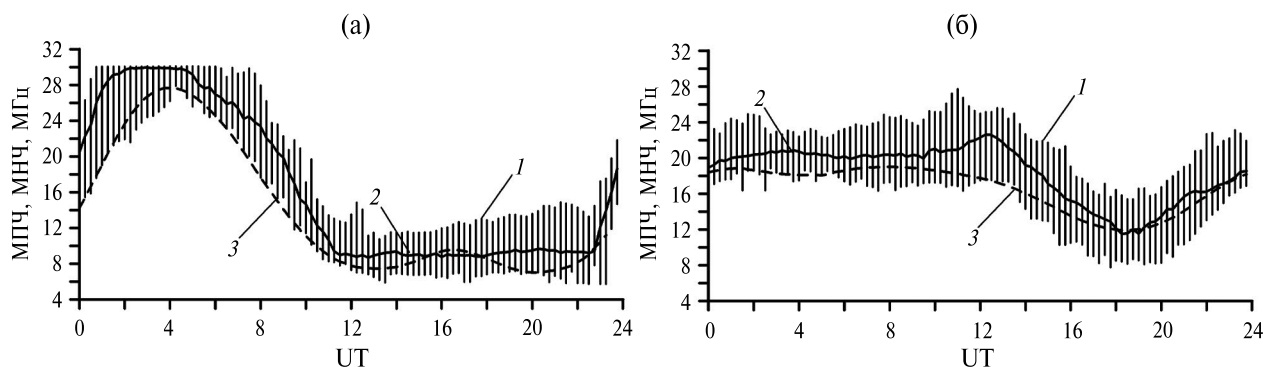


Рис. 3. Суточные вариации медианы МНЧ и расчетной МПЧ в январе (а) и августе (б) 2013 г. на трассе Магадан–Иркутск: 1 – интервалы изменения МНЧ, 2 – медиана МНЧ, 3 – расчетные МПЧ.

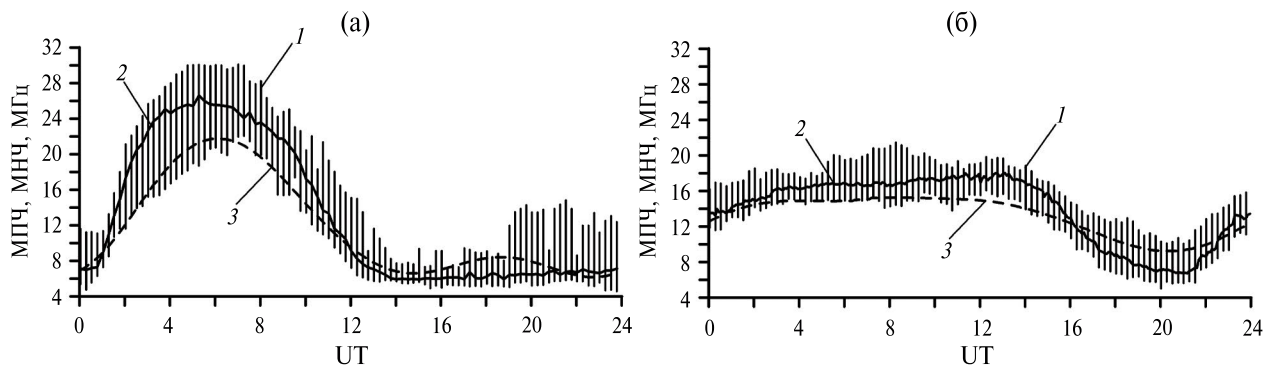


Рис. 4. Суточные вариации медианы МНЧ и расчетной МПЧ в январе (а) и августе (б) 2013 г. на трассе Норильск–Иркутск: 1 – интервалы изменения МНЧ, 2 – медиана МНЧ, 3 – расчетные МПЧ.

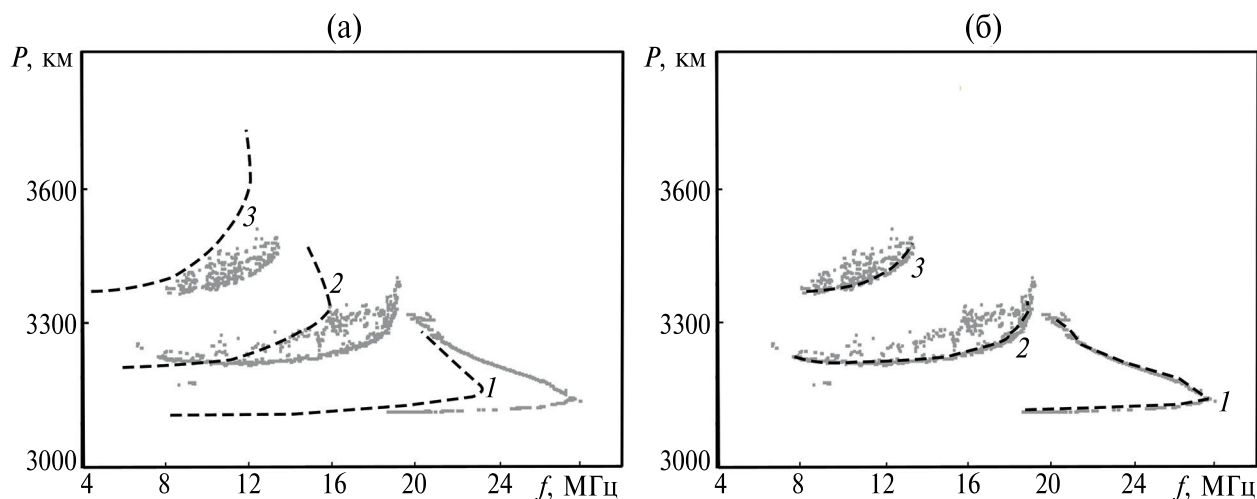


Рис. 5. Ионограмма НЗ на трассе Магадан–Иркутск для 02.02.2023, 00:15 UT: а – результаты моделирования ДЧХ, б – результаты интерпретации модов распространения; результаты вторичной обработки данных – серые точки, результаты моделирования и интерпретации: 1 – мод 1F2, 2 – мод 2F2, 3 – мод 3F2.

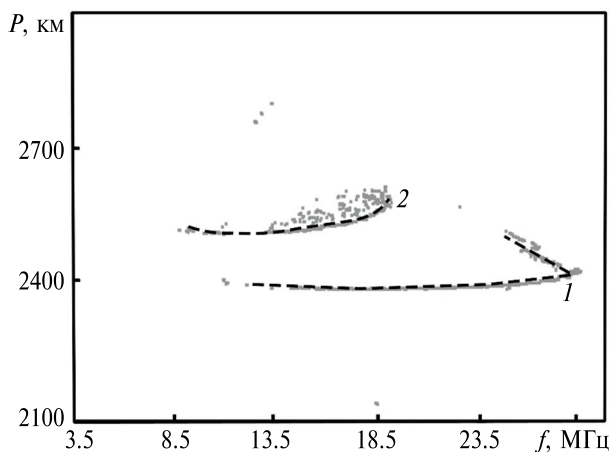


Рис. 6. Ионограмма НЗ на трассе Хабаровск–Иркутск для 02.02.2023, 00:51 UT и результаты интерпретации модов распространения 1F2 (1) и 2F2 (2); результаты вторичной обработки данных – серые точки.

России показала его эффективность в различных гелио-геофизических условиях. На рис. 3 приведены суточные вариации медианы МНЧ для мода распространения 1F2 в январе и августе 2013 г. на среднеширотной трассе Магадан–Иркутск (длина 3000 км) и интервалы изменения МНЧ в течение месяца, а также результаты расчета МПЧ мода 1F2 по модели ионосферы IRI-2016 [47]. Стандартные отклонения относительной ошибки прогноза в январе и августе составили 9.8% и 5.2% соответственно.

Аналогичные суточные вариации медианы МНЧ и расчетных МПЧ для мода распространения 1F2 на меридиональной трассе Норильск–Иркутск (длина 2088 км) приведены на рис. 4. Для трассы Норильск–Иркутск стандартные отклонения ошибки прогноза составили 19% и 15.7% соответственно в январе и августе 2013 г.

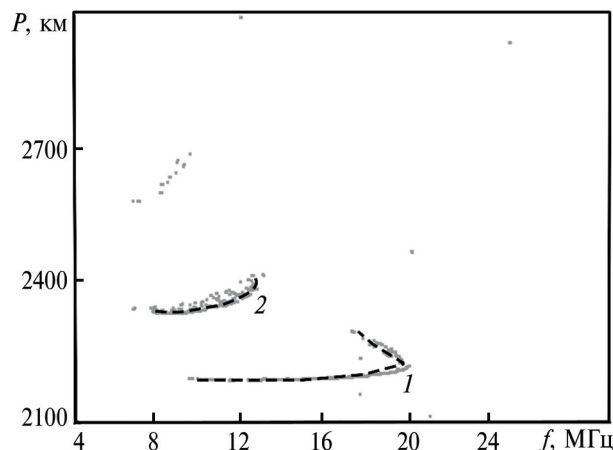


Рис. 7. Ионограмма НЗ на трассе Норильск – Иркутск для 02.02.2023, 02:03 UT и результаты интерпретации модов распространения 1F2 (1) и 2F2 (2); результаты вторичной обработки данных – серые точки.

Для анализа экспериментальных данных, определения максимальных применимых частот и построения треков отдельных модов распространения был реализован алгоритм автоматической интерпретации ионограмм НЗ. На рис. 5а приведены ионограмма НЗ, полученная 2 февраля 2023 г. на трассе Магадан–Иркутск, после вторичной обработки, и результаты моделирования ДЧХ НЗ по долгосрочному прогнозу с использованием модели ионосферы IRI-2016. Погрешность долгосрочного прогноза МПЧ мода 1F2 составила ~18%. На рис. 5б приведены результаты интерпретации ионограммы, на основании которой идентифицированы сигналы, относящиеся к модам

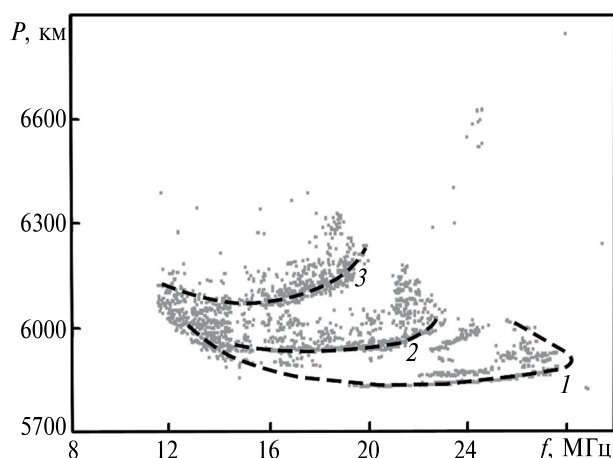


Рис. 8. Ионограмма НЗ на трассе Кипр–Иркутск для 04.01.2023, 04:45 UT и результаты интерпретации модов распространения: 1 – мод 2F2, 2 – мод 3F2, 3 – мод 4F2, результаты вторичной обработки данных – серые точки.

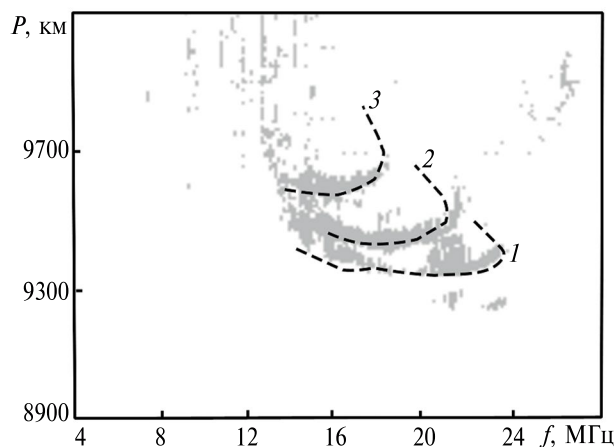


Рис. 9. Ионограмма НЗ на трассе Алис-Спрингс–Иркутск, полученная 11.03.1996 в 05:33 UT и результаты интерпретации модов распространения: 1 – мод 3F2, 2 – мод 4F2, 3 – мод 5F2; результаты вторичной обработки данных – серые точки.

распространения 1F2, 2F2, 3F2, и скорректированы прогнозные ДЧХ НЗ этих модов.

На рис. 6 приведены ионограмма НЗ, полученная 2 февраля 2023 г. в 00:51 UT на трассе Хабаровск–Иркутск (длина 2297 км), и результаты интерпретации модов распространения 1F2 и 2F2. На рис. 7 приведены ионограмма НЗ, полученная 2 февраля 2023 г. в 02:03 UT на трассе Норильск–Иркутск, и результаты интерпретации модов распространения 1F2 и 2F2.

Разработанные методы и алгоритмы прогнозирования и анализа характеристик распространения применимы и для исследования протяженных КВ-радиотрасс. На рис. 8 приведены ионограмма НЗ, полученная 4 января 2023 г. в 04:45 UT на трассе Кипр–Иркутск (длина 5650 км), и результаты интерпретации ДЧХ. Данная трасса проходит в средних широтах. Видно, что алгоритм интерпретации ионограммы позволяет идентифицировать моды распространения 2F2, 3F2 и 4F2 с последующей корректировкой ДЧХ.

На рис. 9 приведены ионограмма НЗ, полученная 11 марта 1996 г. на трансэкваториальной трассе Алис-Спрингс–Иркутск (длина 8937 км) и результаты интерпретации модов распространения 3F2, 4F2 и 5F2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Развит метод моделирования характеристик КВ-радиосигналов на основе волноводного подхода – метода нормальных волн:

– разработана схема решения радиальной задачи и построения спектра радиального оператора применительно к низкочастотной части декаметрового диапазона;

— разработаны численные алгоритмы расчета характеристик нормальных волн с учетом комплексности спектрального параметра радиальной краевой задачи;

— разработаны алгоритмы моделирования дистанционно-частотных, частотно-угловых и амплитудных характеристик сигналов на КВ-радиотрассах на основе анализа и численного суммирования ряда нормальных волн;

— разработан метод и алгоритм автоматической интерпретации ионограмм НЗ на основе указанных алгоритмов и результатов вторичной обработки данных;

— реализован комплексный алгоритм для исследования КВ радиотрасс, включающий модель среды, алгоритмы расчета характеристик сигналов и автоматической интерпретации ионограмм.

Результаты работы комплексного алгоритма могут быть использованы как входные параметры для анализа и выделения искажений сигналов, регистрируемых на КВ-радиотрассах.

Проведен анализ экспериментальных данных наклонного зондирования ионосферы на радиотрассах различной протяженности и ориентации.

Авторы данной работы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № 075-ГЗ/Ц3569/278).

Экспериментальные данные получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Ангара» <http://ckp-rf.ru/ckp/3056/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Anderson S.* // J. Engineering. 2019. V. 2019. № 20. P. 6772. DOI: 10.1049/joe.2019.0537.
2. *Ayliffe J. K., Durbridge L. J., Gordon J. F. et al.* // Radio Sci. 2019. V. 54. № 1. P. 104. DOI: 10.1029/2018RS006681.
3. *Ivanov V. A., Ivanov D. V., Ryabova N. V. et al.* // Radio Sci. 2019. V. 54. № 1. P. 34. DOI: 10.1029/2018RS006636.
4. *Ivanov D. V., Ivanov V. A., Ovchinnikov V. V. et al.* // ITM Web Conf. 2019. V. 30. Article No. 15021. DOI: 10.1051/itmconf/20193015021.
5. *Казанцев А. Н., Лукин Д. С., Спиридонов Ю. Г.* // Космич. исслед. 1967. Т. 5. № 4. С. 593.
6. *Лукин Д. С., Спиридонов Ю. Г.* // РЭ. 1969. Т. 14. № 9. С. 1673.
7. *Кравцов Ю. А., Орлов Ю. И.* Геометрическая оптика неоднородных сред. М.: Наука, 1980.
8. *Croft T. A., Hoogasian H.* // Radio Sci. 1968. V. 3. № 1. P. 69. DOI: 10.1002/rds19683169.
9. *Kelso J. M.* // Radio Sci. 1968. V. 3. № 1. P. 1. DOI: 10.1002/rds1968311.
10. *Haselgrove J.* // Proc. Phys. Soc. B. 1957. V. 70. № 7. P. 653.
11. *Mullaly R. F.* // Australian J. Phys. 1962. V. 15. № 2. P. 96. DOI: 10.1071/PH620096.
12. *Rao N. N.* // Radio Sci. 1968. V. 3. № 12. P. 1113. DOI: 10.1002/rds1968312113.
13. *Ипатов Е. Б., Лукин Д. С., Палкин Е. А.* // Изв. вузов. Радиофизика. 1990. Т. 33. № 5. С. 562.
14. *Крюковский А. С., Лукин Д. С., Палкин Е. А., Растягаев Д. В.* // РЭ. 2006. Т. 51. № 10. С. 1155.
15. *Ипатов Е. Б., Крюковский А. С., Лукин Д. С. и др.* // РЭ. 2014. Т. 59. № 12. С. 1180. DOI: 10.7868/S0033849414120079.
16. *Авдеев В. Б., Демин А. В., Кравцов Ю. А. и др.* // Изв. вузов. Радиофизика. 1988. Т. 31. № 11. С. 1279.
17. *Zernov N. N., Gherm V. E., Zaalov N. Y., Nikitin A. V.* // Radio Sci. 1992. V. 27. № 2. P. 235. DOI: 10.1029/91rs02920.
18. *Черкашин Ю. Н.* // РЭ. 1971. Т. 16. № 1. С. 173.
19. *Baranov V. A., Popov A. V.* // Wave Motion. 1993. V. 17. № 4. P. 337. DOI: 10.1016/0165-2125(93)90013-6.
20. *Гуревич А. В., Цедилина Е. Е.* Сверхдальнее распространение коротких радиоволн. М.: Наука, 1979.
21. *Baranov V. A., Karpenko A. L., Popov A. V.* // Radio Sci. 1992. V. 27. № 2. P. 307. DOI: 10.1029/91RS02639.
22. *Анютин А. П., Орлов Ю. И.* // РЭ. 1977. Т. 22. № 10. С. 2082.
23. *Краснушкин П. Е.* Метод нормальных волн в применении к проблеме дальних радиосвязей. М.: Изд-во МГУ, 1947.
24. *Bremmer H.* Terrestrial Radio Waves. Theory of Propagation. N.Y.: Elsevier Publ. Co., Inc. 1949.
25. *Куркин В. И., Орлов И. И., Попов В. Н.* Метод нормальных волн в проблеме коротковолновой радиосвязи. М.: Наука, 1981.
26. *Краснушкин П. Е., Яблочкин Н. А.* Теория распространения сверхдлинных волн. М.: ВЦ АН СССР, 1963.
27. *Макаров Г. И., Новиков В. В., Рыбачек С. Т.* Распространение радиоволн в волноводном канале Земля–ионосфера и в ионосфере. М.: Наука, 1993.
28. *Алуэзль Д. С., Келлер Д. Б.* Распространение волн и подводная акустика / Под ред. Дж. Б. Келлера, Дж. С. Пападакиса. М.: Мир, 1980. С. 20.
29. *Kamel A., Felsen L. B.* // J. Acoust. Soc. Amer. 1982. V. 71. № 6. С. 1445. DOI: 10.1121/1.387841.

30. Куркин В. И. Моделирование, диагностика и прогнозирование характеристик КВ-сигналов на основе метода нормальных волн. Дисс. ... д-ра физ.-мат. наук. Иркутск: ИрГУ, 1999. 308 с.
31. Потехин А. П. Развитие радиофизических методов исследования верхней атмосферы Земли в метровом и декаметровом диапазонах волн. Дисс. ... д-ра физ.-мат. наук. Иркутск: ИрГУ, 2002. 286 с.
32. Grozov V. P., Ilyin N. V., Kotovich G. V., Ponomarchuk S. N. // Pattern Recognition and Image Analysis. 2012. V. 22. № 3. P. 458.
DOI: 10.1134/S1054661812030042
33. Khakhinov V. V., Kurkin V. I. // Proc. 11 th Int. Conf. Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET-2006). Kharkiv, 26–29 Jun. 2006. N.Y.: IEEE, 2006. P. 284.
DOI: 10.1109/MMET.2006.1689768
34. Куркин В. И., Хахинов В. В. // Исследования по геомагнетизму, аэрономии и физике Солнца. М.: Наука, 1984. Вып. 69. С. 16.
35. Айзенберг Г. З., Белоусов С. П., Журбенко Э. М. и др. Коротковолновые антенны. М.: Радио и связь, 1985.
36. Ponomarchuk S., Ilyin N., Kurkin V., Penzin M. // 2022 IEEE8th All-Russian Microwave Conf. (RMC). Moscow 23–25 Nov. N.Y.: IEEE, 2022. P. 246.
DOI: 10.1109/RMC55984.2022.10079690
37. Хединг Д. Введение в метод фазовых интегралов (метод ВКБ). М.: Мир, 1965.
38. Фок В. А. Проблемы диффракции и распространения электромагнитных волн. М.: Сов. радио, 1970.
39. Dyson P. L., Bennett J. A. // J. Atmospheric and Terrestrial Phys. 1988. V. 50. № 3. P. 251.
DOI: 10.1016/0021–9169(88)90074–8
40. Дэвис К. Радиоволны в ионосфере. М.: Мир, 1973.
41. Инструкция по обработке ионограмм наклонного зондирования / Под ред. Ю. В. Виноградовой. Л.: Гидрометеиздат, 1985.
42. Пономарчук С. Н., Грозов В. П., Ильин Н. В. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2021. Т. 64. № 8–9. С. 665.
DOI: 10.52452/00213462_2021_64_08_655
43. Иванов В. А., Куркин В. И., Носов В. Е. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2003. Т. 46. № 11. С. 919.
44. Davydenko M. A., Ilyin N. V., Khakhinov V. V. // J. Atmospheric and Solar-terrestrial Physics. 2002. V. 64. № 17. P. 1897.
45. Подлесный А. В., Лебедев В. П., Ильин Н. В., Хахинов В. В. // Электромагнитные волны и электронные системы. 2014. Т. 19. № 1. P. 63.
46. Подлесный А. В., Брынько И. Г., Куркин В. И. и др. // Гелиогеофизические исследования. 2013. № 4. С. 24.
47. Bilitza D., Altadill D., Truhlik V. et al. // Space Weather. 2017. V. 15. № 2. P. 418.

APPLICATION OF WAVEGUIDE APPROACH TO STUDYING SHORTWAVE RADIO PATHS

S. N. Ponomarchuk*, N. V. Ilyin, V. I. Kurkin, M. S. Penzin

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Lermontov Str., 126a, Irkutsk, 664033 Russian Federation
E-mail: spon@iszf.irk.ru

Received October 28, 2023, revised April 10, 2024, accepted April 25, 2024

The method of modeling for shortwave (HF) radio paths based on the waveguide approach – the method of normal waves – has been developed. A scheme has been developed for solving the radial problem and constructing the spectrum of the radial operator for the low-frequency part of the decameter range. Algorithms have been developed for calculating remote-frequency, frequency-angular and amplitude characteristics of signals in large spatial regions on the base of analysis and numerical summation of normal wave series. The complex algorithm is implemented for the study of HF radio paths, including a medium model, algorithms for calculating signal characteristics and operational diagnostics of the radio channel.

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