УДК 550.388.2

### НАКЛОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ИОНОСФЕРЫ С ПОМОЩЬЮ ИОНОЗОНДА-РАДИОПЕЛЕНГАТОРА С ЛИНЕЙНОЙ ЧАСТОТНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ СИГНАЛА

Г. Г. Вертоградов<sup>1</sup>, В. П. Урядов<sup>\* 2,3</sup>, М. С. Скляревский<sup>1</sup>, В. А. Валов<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону;

<sup>2</sup> Научно-исследовательский радиофизический институт ННГУ им. Н. И. Лобачевского, г. Нижний Новгород;

 $^3$  AO «Научно-производственное предприятие «Полёт», г. Нижний Новгород, Россия

В работе приводятся математическое обоснование, алгоритм работы и аппаратная реализация многоканального ионозонда-радиопеленгатора с линейной частотной модуляцией сигнала. Представлены результаты экспериментальных исследований двумерных угловых частотных характеристик на меридиональной трассе наклонного зондирования Кипр—Ростов-на-Дону. Показано, что как регулярные (связанные с терминатором), так и нерегулярные (вызванные прохождением перемещающегося ионосферного возмущения через трассу распространения) поперечные (относительно трассы распространения) горизонтальные градиенты электронной концентрации приводят к отклонению азимута угла прихода верхнего луча в направлении данного градиента. Экспериментальные данные сопоставляются с результатами моделирования.

#### ВВЕДЕНИЕ

Современный уровень решения научных и практических задач, связанных с распространением радиоволн в ионосфере, предполагает разработку и создание новых средств диагностики ионосферной плазмы с улучшенными техническими характеристиками. Для диагностики ионосферного канала в различных гелиогеофизических условиях создан новый, не имеющий в мире аналога, инструмент — ионозонд-радиопеленгатор с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) сигнала. Данный прибор позволяет в реальном времени одновременно измерять ключевые характеристики ионосферного канала во всём диапазоне частот прохождения коротковолновых радиосигналов на всех модах распространения, в том числе аномальных сигналов, обусловленных рассеянием радиоволн от земли (горы, возвышенности, морская поверхность), а также рассеянием от ионосферных неоднородностей естественного и искусственного происхождения [1].

ЛЧМ-ионозонд-радиопеленгатор — уникальный и многоцелевой инструмент, который прошёл многолетнюю апробацию на трассах с различной протяжённостью и ориентацией в различных геофизических условиях. С его помощью получен ряд новых научных результатов, касающихся явления *F*-рассеяния в среднеширотной ионосфере [2], трансполярного, трансэкваториального и кругосветного распространения [3–6], были проведены исследования тонкой структуры искусственной ионосферной турбулентности [7], определён полный вектор скорости дрейфа искусственных мелкомасштабных неоднородностей [8, 9].

В ионосферных исследованиях значительный интерес представляет использование ЛЧМ-ионозонда-радиопеленгатора для изучения особенностей распространения верхнего луча в различных геофизических и ионосферных условиях. Дело в том, что верхний луч (мода Педерсена) весьма чувствителен к вариациям электронной концентрации в окрестности максимума *F*-слоя (где он распространяется) и анализ его характеристик в сочетании с моделированием позволяет

<sup>\*</sup> uryadovvp@nirfi.sci-nnov.ru

получить данные о тонкой структуре в этой области ионосферы, важной для распространения радиоволн. Так, на трассе ЛЧМ-зондирования Хабаровск-Нижний Новгород экспериментально показана и теоретически подтверждена возможность локализации поля волны, порождённой педерсеновской модой, во флуктуационном волноводе в окрестности максимума F-слоя за счёт интерференции радиоволн, многократно рассеянных на случайно-слоистых неоднородностях [10]. С помощью ЛЧМ-ионозонда-радиопеленгатора впервые получены данные о влиянии регулярных и нерегулярных градиентов электронной концентрации на угловые частотные характеристики (УЧХ) нижнего и верхнего лучей [5]. Показано, что на меридиональной трассе Кипр—Ростов-на-Дону при прохождении утреннего терминатора азимут верхнего луча отклоняется к востоку на  $1^{\circ}$ ;  $2^{\circ}$  относительно азимута нижнего луча, совпадающего с азимутом на передающий пункт (Кипр). Этот эффект связан с влиянием регулярного горизонтального градиента электронной концентрации в окрестности максимума F-слоя, когда в дополуденные часы имеет место рост концентрации в восточном направлении. С появлением на ионограммах наклонного зондирования Z-образных треков на верхнем луче, вызванных прохождением перемещающегося ионосферного возмущения, азимут угла прихода верхнего луча смещался в западном направлении и становился больше азимута угла прихода нижнего луча, а после прохождения возмущения азимут верхнего луча снова отклонялся в восточном направлении.

В статье даётся описание многоканального цифрового ЛЧМ-комплекса пеленгования и представлены новые результаты измерений УЧХ нижнего и верхнего лучей на среднеширотной трассе меридиональной ориентации Кипр—Ростов-на-Дону в различных ионосферных условиях.

# 1. МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИСТАНЦИОННЫХ, АМПЛИТУДНЫХ И УГЛОВЫХ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОРОТКОВОЛНОВЫХ СИГНАЛОВ С ПОМОЩЬЮ МНОГОКАНАЛЬНОГО ЛЧМ-ИОНОЗОНДА-РАДИОПЕЛЕНГАТОРА

Как показано в работе [11], при приёме ЛЧМ-сигналов амплитуда в максимумах спектральной плотности мощности (СПМ) разностного сигнала пропорциональна амплитуде парциальных лучей, формирующих интерференционное поле коротковолновых сигналов в зоне приёма, а фаза с точностью до постоянного аддитивного слагаемого совпадает с их начальными фазами. Это свойство положено в основу измерения УЧХ при наклонном зондирования ионосферы с помощью многоканального цифрового комплекса пеленгования.

Будем полагать, что приём осуществляется многоканальным когерентным цифровым ЛЧМприёмником, каждый канал которого реализует в цифровом виде оптимальное преобразование принимаемого ЛЧМ-сигнала к разностному сигналу [11]. Считаем, что приём осуществляется на N-элементную антенную решётку, координаты её отдельных элементов есть  $\mathbf{r}_n$ ,  $n = 0, 1, \ldots, N - 1$ . В этом случае начальная фаза j-го парциального луча при приёме n-м антенным элементом может быть представлена в виде

$$\Psi_{jn} = \Psi_{0j} + \mathbf{k}_j \mathbf{r}_n,\tag{1}$$

где  $\Psi_{0j}$  — начальная фаза, не зависящая от координат приёмной антенны,  $\mathbf{k}_j = \frac{2\pi}{\lambda}(-\cos \Delta_j \times \sin \alpha_j, -\cos \Delta_j \cos \alpha_j, -\sin \Delta_j)$  — волновой вектор,  $\lambda$  — длина волны,  $\Delta_j, \alpha_j$  — угол места и азимут *j*-го парциального луча соответственно (эти лучи формируют поле волны в зоне приёма). В этом случае разность фаз напряжений  $\Delta \Psi_{jnk}$ , наводимых *j*-м лучом на *n*-ой и *k*-ой антеннах, не зависит от  $\Psi_{0j}$  и выбора начала системы координат, а определяется только углами прихода и ориентацией вектора  $\Delta \mathbf{r}_{nk} = \mathbf{r}_n - \mathbf{r}_k$ :

$$\Delta \Psi_{jnk} = \Psi_{jn} - \Psi_{jk} = \mathbf{k}_j \,\Delta \mathbf{r}_{nk}.\tag{2}$$

Г. Г. Вертоградов, В. П. Урядов, М. С. Скляревский, В. А. Валов

Измеряя множество значений { $\Delta \Psi_{jnk}$ } для пространственно разнесённых антенных элементов, можно определить двумерные угловые координаты парциальных лучей интерферометрическим способом [12, 13]. Многоканальный ЛЧМ-ионозонд благодаря оптимальной обработке широкополосных сигналов позволяет разделить суммарное интерференционное поле на парциальные лучи по групповой задержке [14, 15]. Как следствие, множество измеренных разностей фаз { $\Delta \Psi_{jnk}$ } разделённых парциальных лучей свободно от интерференционных погрешностей, которые в классических коротковолновых пеленгаторах, построенных по интерферометрическому принципу, приводят к ошибкам измерений как азимута, так и угла места [16, 17].

Будем предполагать, что сигнал оцифровывается по промежуточной частоте многоканальным аналого-цифровым преобразователем (АЦП) с частотой  $f_d$  и обозначим через  $\Delta t = 1/f_d$ шаг дискретизации разностного сигнала. В каждый момент времени многоканальное радиоприёмное устройство подключено ко всем антенным элементам N-элементной решётки (использовалась решётка из 16 антенных элементов). С каждого антенного элемента делается выборка сигнала с длиной M. Полагаем, что средняя частота принимаемого сигнала равна  $f_l = f_{\min} +$  $+ \mu_0 \Delta t Ml$ , где  $l = 0, 1, \ldots, L - 1$  — номер дискретной частоты, на которой оцениваются углы прихода,  $L = (f_{\max} - f_{\min})/(\mu_0 \Delta t M)$  — количество дискретных частот,  $\mu_0$  — скорость перестройки частоты. Углы прихода оцениваются на равномерной частотной сетке, значения частот в узлах которой равны  $f_l$ . Без ограничения общности будем полагать, что антенная решётка расположена в плоскости земли и имеет произвольную пространственную конфигурацию. С учётом введённых обозначений фаза ЛЧМ-сигнала для *j*-го луча на *n*-ом антенном элементе имеет вид

$$\Psi_{jnl} = 2\pi f_l(\cos\Delta_j\,\sin\alpha_j,\cos\Delta_j\,\cos\alpha_j)\mathbf{r}_n/c,\tag{3}$$

где  $\mathbf{r}_n = (r_n \cos \alpha_n, r_n \sin \alpha_n)$  — радиус-вектор антенного элемента в плоскости земли. В то же время измеренную фазу сигнала обозначим  $\Phi_{jnl}$ . Изменением неизвестных углов прихода *j*-го луча  $\alpha$  и  $\Delta$  может быть синтезирована комплексная нормированная диаграмма направленности

$$D_{jl}(\alpha, \Delta) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \exp\left\{i\left[\Phi_{jnl} - \frac{2\pi}{c} f_l r_n \cos\Delta \cos(\alpha - \alpha_n)\right]\right\}.$$
(4)

При значениях углов  $\alpha$  и  $\Delta$ , соответствующих направлению прихода *j*-го луча,  $\alpha_j$  и  $\Delta_j$ , функции  $|D_{jl}(\alpha, \Delta)|$  и  $\operatorname{Re}D_{jl}(\alpha, \Delta)$  одновременно достигают максимального значения, равного 1, а  $\operatorname{Im}D_{jl}(\alpha, \Delta)$  обращается в ноль. Как следствие, алгоритм определения двумерного направления прихода *j*-го луча по измеренным разностям фаз  $\Phi_{jnl}$  на дискретной частоте  $f_l$  сводится к отысканию глобального максимума функций  $|D_{jl}(\alpha, \Delta)|$  или  $\operatorname{Re}D_{jl}(\alpha, \Delta)$  [12, 13]. Обратим внимание на отличия в процедурах максимизации функций  $|D_{jl}(\alpha, \Delta)|$  и  $\operatorname{Re}D_{jl}(\alpha, \Delta)$ . Функция  $|D_{jl}(\alpha, \Delta)|$  не зависит от фазового множителя типа  $\exp(i\varphi)$ . В этом случае начало координат антенной решётки может быть выбрано произвольно. Одновременно максимизация функции  $\operatorname{Re}D_{jl}(\alpha, \Delta)$  обладает двумя преимуществами: отсутствуют боковые лепестки синтезированной диаграммы, обусловленные мнимой частью  $\operatorname{Im}D_{jl}(\alpha, \Delta)$ , и ширина главного лепестка  $\operatorname{Re}D_{jl}(\alpha, \Delta)$  меньше.

Для оценки достоверности найденных углов прихода j-го луча  $\alpha$  и  $\Delta$  формулу (4) перепишем в виде

$$D_{jl} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \cos(\Delta \Phi_{jnl}) + i \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \sin(\Delta \Phi_{jnl}) \equiv \langle \cos \Delta \Phi_{jl} \rangle + i \langle \sin \Delta \Phi_{jl} \rangle$$

где  $\Delta \Phi_{jnl}$  — отклонение измеренных разностей фаз  $\Phi_{jnl}$  от теоретических  $\Psi_{jnl}$  для плоской волны в заданной пространственной точке расположения *n*-ой антенны. Тогда выражения  $\langle \cos \Delta \Phi_{jl} \rangle$ и  $\langle \sin \Delta \Phi_{jl} \rangle$  имеют смысл усреднённых по апертуре антенной решётки (по пространственному

индексу *n*) косинусов и синусов случайных отклонений пространственных разностей фаз. В силу сказанного, с учётом статистической теории угловых измерений [18], величина

$$\sigma_{jl} = \sqrt{-2\ln\sqrt{\langle\sin\Delta\Phi_{jl}\rangle^2 + \langle\cos\Delta\Phi_{jl}\rangle^2}} = \sqrt{-2\ln|D_{jl}|} \tag{5}$$

имеет смысл среднеквадратичного углового отклонения измеренных фаз  $\Phi_{jnl}$  от теоретических значений  $\Psi_{jnl}$  для плоской волны и может быть принята за оценку качества найденных углов прихода. Отметим, что при малых отклонениях  $\Delta \Phi_{jnl}$  величина (5) совпадает с традиционно вычисляемым линейным среднеквадратичным отклонением [18]. Для плоского волнового фронта величина (5) обращается в ноль и характеризует степень совпадения фронта падающей волны для выделенного *j*-го луча с плоским [13]. Малость величины  $\sigma_{jl}$  является необходимым условием достоверности найденных углов прихода.

Основными компонентами действующего многоканального ЛЧМ-ионозонда-радиопеленгатора, предназначенного для измерения угловых частотных характеристик, являются:

1) антенная решётка, состоящая из 16 ненаправленных антенных элементов, расположенных на поверхности земли (использованы активные штыревые антенны с высотой 2,5 м, размещённые на площадке 80 × 80 м);

2) 16-канальное когерентное широкополосное радиоприёмное устройство (РПУ) с промежуточной частотой 70 МГц и шириной полосы приёма до 1 МГц;

3) четыре когерентных 4-канальных модуля цифровой обработки сигналов с первичной частотой оцифровки 16 МГц;

4) синтезатор и разветвитель тактовой частоты с возможностью внешнего запуска преобразования, обеспечивающий когерентность четырёх модулей цифровой обработки сигналов, каждый из которых содержит 4-канальный АЦП;

5) приёмник GPS для временной синхронизации комплекса и запуска модуля цифровой обработки сигналов измерительного комплекса по секундной метке;

6) рубидиевый стандарт частоты (Rubidium Frequency Standard FS725), формирующий высокостабильную опорную частоту 10 МГц для многоканального РПУ и многоканального модуля цифровой обработки сигналов;

7) многопроцессорный многоядерный промышленный компьютер для многопоточной обработки цифровых сигналов и получения информационных параметров.

Основу аппаратной части разработанного образца ЛЧМ-ионозонда-радиопеленгатора составляют модули цифровой обработки сигналов, для которых создан программируемый ЛЧМфильтр, позволяющий непрерывно перестраивать цифровой узкополосный фильтр 10 кГц вторичного канала в полосе приёма РПУ 1 МГц. На выходе каждого из 16-ти вторичных каналов получаются квадратурные компоненты разностного сигнала. Выходной вторичный цифровой поток квадратурных компонент дискретизирован с частотой  $f_d = 20\,000$  Гц. При переходе частоты зондирующего ЛЧМ-сигнала через границу текущей полосы настройки 16-канального РПУ он программно перестраивается на новую полосу с шириной 1 МГц. Процесс получения квадратурных компонент разностного сигнала и квадратурной дискретизации продолжается непрерывно. Модули цифровой обработки сигналов обеспечивают первичную оцифровку сигнала на промежуточной частоте с частотой оцифровки 16 МГц и предварительную обработку цифрового сигнала, состоящую в его фильтрации, понижении частоты дискретизации до 20 кГц и перестройке узкополосного цифрового фильтра с полосой 10 кГц с заданной скоростью (до 1000 кГц/с).

Сигнал секундной метки GPS подаётся на вход синтезатора тактовой частоты. Для обеспечения жёсткой временной привязки ЛЧМ-ионозонда-радиопеленгатора к сигналам наклонного

Г. Г. Вертоградов, В. П. Урядов, М. С. Скляревский, В. А. Валов

ЛЧМ-зондирования для данного модуля разработан внутренний цифровой таймер, синхронизируемый по секундной метке GPS. Сигнал с выходов промежуточной частоты каждого канала РПУ подаётся на соответствующие входы многоканального модуля цифровой обработки сигналов. Управление РПУ и цифровой обработкой сигналов, а также цифровая обработка сигнала с целью извлечения информационных параметров осуществляется с помощью многопроцессорного компьютера в множестве потоков по количеству ядер процессоров.

Алгоритм работы ЛЧМ-пеленгатора состоит из следующих основных этапов.

1) Диапазон 1,5÷30 МГц разбивается на поддиапазоны по 500 кГц (ширина поддиапазона может изменяться в пределах 500÷1000 кГц) и автоматически проводится предварительная калибровка трактов РПУ во всех поддиапазонах. Для этого к антенным входам многоканального РПУ подключаются выходы N-канального калибровочного генератора шума. Отсчёты регистрируются, и выполняется N преобразований Фурье длиной  $2^m$  для каждого поддиапазона. В результате образуются комплексные матрицы спектральных отсчётов  $s_{n,k}$ ,  $n = 0, \ldots, N-1, k = 0, \ldots, 2^m-1, M = 2^m$  с размерностью  $N \cdot 2^m$  (по одной для каждого поддиапазона), из которых затем формируются и запоминаются комплексные калибровочные матрицы по формуле  $M_{n,k} = s_{0,k}/s_{n,k}$ , где индекс 0 соответствует выбранному опорному каналу (опорный канал может выбираться при настройке аппаратуры произвольно).

2) РПУ настраивается на центральную частоту первого поддиапазона.

3) Частота дискретизации ЛЧМ-фильтра модуля цифровой обработки сигналов устанавливается равной 20 кГц, что значительно меньше полосы пропускания РПУ, работающего в широкополосном режиме 1 МГц. Полоса перестройки ЛЧМ-фильтра устанавливается равной ширине поддиапазонов 500 кГц.

4) По сигналу секундной метки начинается процедура оцифровки всех 16-ти первичных каналов на промежуточной частоте многоканального РПУ, перестройка вторичных узкополосных оптимальных ЛЧМ-фильтров цифровой обработки сигналов и ввод квадратурных компонент разностного сигнала. Следует отметить, что ЛЧМ-фильтр автоматически перестраивает среднюю частоту узкополосного оптимального фильтра в соответствии со скоростью перестройки ЛЧМ-сигнала в полосе выбранного поддиапазона.

5) Как только средняя частота ЛЧМ-фильтра достигает своего максимального значения, ограниченного полосой перестройки ЛЧМ-фильтра и шириной поддиапазона, выдаётся аппаратное прерывание модуля цифровой обработки сигналов. По этому прерыванию многоканальное РПУ перестраивается на среднюю частоту следующего поддиапазона. Средняя частота ЛЧМфильтра устанавливается равной начальному значению (в начале мегагерцовой полосы пропускания многоканального РПУ), продолжается перестройка ЛЧМ-фильтра, и т. д. При этом процедуры оцифровки и ввода комплексного разностного сигнала проводятся непрерывно. Другими словами, РПУ перестраивается дискретно с шагом 500 кГц, а оптимальный ЛЧМ-фильтр перестраивается непрерывно в полосе 500 кГц, попадающей в полосу приёма РПУ.

6) После ввода части реализации комплексного разностного сигнала с заданной длительностью параллельно выполняются N быстрых преобразований Фурье, в результате чего формируется матрица сигнальных спектральных отсчётов  $s_{n,k}$ , которая замещается скорректированной матрицей  $\tilde{s}_{n,k} = s_{n,k}\tilde{M}_{n,k}$ , где  $\tilde{M}_{n,k}$  — калибровочная матрица, полученная путём аппроксимации по узлам элементов матрицы  $M_{n,k}$  для данного поддиапазона.

7) Усреднением статистически независимых спектральных плотностей мощности  $\tilde{s}_{n,k}$  по всем приёмным каналам достигается получение состоятельной оценки спектральной плотности мощности сигналов в полосе РПУ по формуле  $\bar{s}_k = \sum_{n=0}^{N-1} |\tilde{s}_{n,k}|^2 / N$ . По средней величине  $\bar{s}_k$  гисто-граммным способом определяется спектральная плотность мощности шума  $s_N$  [15].

8) Далее начинается процедура обнаружения лучей в полосе приёма и определение их про-

странственных амплитудно-фазовых распределений и пеленгование, как описано в работах [12, 13]. Для этого определяется взаимная спектральная плотность мощности для опорного канала и всех антенных элементов  $S_{n0,k} = s_{nk}s_{0k}^*$ ,  $n = 0, 1, \ldots, N - 1$ .

9) На основе численно построенной диаграммы направленности антенной решётки (4) выполняется оценка двумерных угловых координат прихода каждого обнаруженного луча по векторам  $\mathbf{S}_0 = \{S_{n0,k}\}$ . При этом задача сводится к глобальной максимизации функции двух переменных  $|D_{jl}(\alpha, \Delta)|$  или  $\operatorname{Re}D_{jl}(\alpha, \Delta)$ . Поскольку функция  $\operatorname{Re}D_{jl}(\alpha, z_p)$  по переменной  $\alpha$  удовлетворяет условию Липшица, то глобальный максимум диаграммы направленности может быть найден на основе алгоритма, предложенного в работе [13]. В заключение проводится проверка критерия достоверности полученного пеленга и угла места по формуле (5).

В процессе зондирования с помощью многоканального ЛЧМ-ионозонда-радиопеленгатора определяются следующие информационные характеристики: дистанционно- и амплитудно-частотные характеристики (ДЧХ) и (АЧХ); количество мод и лучей распространения; наименьшая и максимальная наблюдаемая частоты каждой моды распространения; интервалы многолучёвости; полосы когерентности на контролируемых частотах, вероятность ошибки и надёжность связи по методике, описанной в работе [15]. Также находятся количество обнаруженных лучей распространения на каждой дискретной частоте  $f_l$ , их амплитуды  $a_{jl}$ , азимуты  $\alpha_{jl}$ , углы места  $\Delta_{jl}$  и задержки  $\tau_{jl}$ .

Особенностью многоканального ЛЧМ-ионозонда-радиопеленгатора является также то, что при измерении УЧХ автоматически достигается очистка результатов зондирования от шумов естественного происхождения и станционных помех, характерных для одноканальных ЛЧМ-ионозондов. Очистка ионограмм осуществляется с помощью критерия малости величины  $\sigma_{jl}$ , который, как указано выше, является необходимым условием достоверности найденных углов прихода.

Оценка географических координат источника радиоизлучения, географического азимута и дальности до источника осуществляется на основе траекторных расчётов [19] в ионосфере, пространственное распределение электронной концентрации в которой задаётся моделью IRI-2012. Отметим, что процедура однопозиционного определения места расположения источника [19], включённая в алгоритм обработки результатов зондирования, преследует две цели. Первая состоит в том, чтобы обеспечить достоверное определение координат неизвестного ЛЧМ-передатчика. Вторая — осуществить автоматическую идентификацию мод и лучей распространения для передатчиков с известными географическими координатами.

Отметим, что работоспособность ЛЧМ-ионозонда-радиопеленгатора экспериментально подтверждена при скоростях перестройки 100; 125; 500 и 550 кГц/с по реально работающим источникам ЛЧМ-излучения, расположенным в следующих городах и странах: Москва, Нижний Новгород, Норильск, Иркутск, Хабаровск, Мурманск, Санкт-Петербург, Салехард и Диксон, Кипр, Франция, Финляндия и Австралия.

# 2. ВЛИЯНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ГРАДИЕНТОВ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ НА УГЛОВЫЕ ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЕРХНЕГО И НИЖНЕГО ЛУЧЕЙ НА ТРАССЕ КИПР—РОСТОВ-НА-ДОНУ

С помощью многоканального ЛЧМ-ионозонда-радиопеленгатора в январе—марте 2016 года на трассе Кипр—Ростов-на-Дону (азимут трассы  $\alpha = 203,21^{\circ}$ , протяжённость S = 1425 км) были проведены исследования влияния регулярных и нерегулярных градиентов электронной концентрации на характеристики коротковолновых сигналов.

Г. Г. Вертоградов, В. П. Урядов, М. С. Скляревский, В. А. Валов

Передатчик, размещённый на Кипре, работал круглосуточно в следующем режиме: начальная частота излучения 8 МГц, конечная частота излучения 32 МГц, начальное время старта с 0 мин каждого часа, период излучения 5 мин, скорость перестройки частоты 100 кГц/с. Приём ЛЧМ-сигналов осуществлялся с помощью ионозонда-радиопеленгатора, размещённого в г. Ростов-на-Дону на полигоне с координатами 47,8964° с. ш., 39,7139° в. д. Измерения проводились в магнитно-спокойных условиях с индексом  $K_{\rm p} = 1 \div 3$ .

Полученные экспериментальные результаты позволяют сделать следующие выводы. На треках верхних лучей обеих магнитоионных компонент как на ДЧХ, так и на зависимостях угла места от частоты наблюдаются Z-образования [20, 21], которые появляются в окрестности наименьшей наблюдаемой частоты и перемещаются со временем в область меньших задержек и углов места. Эти особенности наблюдаются в различные часы суток, но наиболее часто Z-образования регистрируются во времена восхода и захода Солнца.

На основе моделирования с помощью имитационной модели декаметрового радиоканала [20, 21] показано, что эти особенности обусловлены движением перемещающихся ионосферных возмущений. Условия возникновения Z-образований связаны не только с амплитудой возмущений, но и с их пространственным квазипериодом, а также с ориентацией волнового вектора перемещающегося возмущения [20, 21].

Следует отметить, что часто, когда на ДЧХ Z-образования не видны или только слегка заметны, их влияние хорошо проявляется в УЧХ, в частности в вариациях угла места.

Несмотря на небольшие отклонения ДЧХ от невозмущённых случаев, девиации угла места могут достигать 5°. Типичные девиации азимута под влиянием перемещающегося ионосферного возмущения составляют  $1^{\circ}\div3^{\circ}$ . Особенно большие отклонения дают возмущения на частотах, близких к максимальной наблюдаемой частоте. Девиации по углу места для верхних лучей практически повторяют по виду отклонения ДЧХ и составляют около  $10^{\circ}$ , при этом девиации по азимуту равняются  $7^{\circ}\div8^{\circ}$ .

Как уже говорилось, на УЧХ верхнего луча заметное влияние оказывают как регулярные (связанные с терминатором), так и нерегулярные (вызванные прохождением перемещающегося ионосферного возмущения через трассу зондирования) горизонтальные градиенты электронной концентрации. Большой объём полученных данных позволил достаточно уверенно выделить влияние обоих градиентов на углы места верхних лучей в различных ионосферных условиях на среднеширотной односкачковой трассе с меридиональной ориентацией. На рис. 1–3 показаны типичные ионограммы поведения ДЧХ, АЧХ и УЧХ в утренние (рис. 1), дневные (рис. 2) и вечерние (рис. 3) часы местного времени для условий невозмущённой ионосферы. Как видно из рисунков, на частотах вдали от максимальной наблюдаемой частоты амплитуда верхнего луча примерно на 30÷40 дБ меньше амплитуды нижнего луча. Вертикальные углы прихода верхнего луча вдали от максимальной наблюдаемой частоты превышают примерно на 10°÷15° углы прихода нижнего луча, что соответствует общепринятым представлениям о механизмах распространения лучей [22].

Обращает на себя внимание тот факт, что в утренние часы азимут угла прихода верхнего луча смещён на 1°÷3° к востоку относительно азимута нижнего луча, совпадающего с азимутом на передающий пункт (Кипр). В дневные часы азимуты углов прихода верхнего и нижнего лучей близки между собой и совпадают с направлением на передатчик. В вечерние часы азимут угла прихода верхнего луча смещён на 1°÷2° к западу относительно азимута угла прихода нижнего луча.

Полученные результаты указывают на влияние регулярных (обусловленных прохождением терминатора) горизонтальных градиентов электронной концентрации, поперечных относительно меридиональной трассы, на азимутальные характеристики верхнего луча. Из рис. 1 и 3 видно,



Рис. 1. Трасса Кипр—Ростов-на-Дону. 04:30 UT 02.03.2016: ДЧХ (*a*), АЧХ (*б*), угол места (*b*) и азимут (*b*). Цифрой *1* обозначен нижний луч, 2<sub>0</sub> и 2<sub>x</sub> — верхние лучи для обыкновенной и необыкновенной магнитоионных компонент, соответственно



Рис. 2. То же, что на рис. 1, для 09:30 UT 02.03.2016

что при прохождении через трассу зондирования утреннего и вечернего терминатора отклонение азимута угла прихода верхнего луча совпадает с направлением поперечного градиента ионизации: утром на восток, вечером на запад. Днём, когда на меридиональной трассе поперечный градиент электронной концентрации слабо выражен, азимут верхнего луча практически совпадает с направлением на передатчик (см. рис. 2).

При прохождении перемещающегося ионосферного возмущения на ионограммах регистрируются сильные искажения верхнего луча: на ДЧХ появляются Z-образования, изменяется азимут угла прихода, расширяется диапазон углов места. На рис. 4 показан пример ионограммы ЛЧМ-ионозонда-радиопеленгатора в условиях мощного возмущения, когда в результате расслоения ионосферы на ДЧХ и УЧХ появляются треки в виде Z-образований.

Для сопоставления с экспериментом мы провели моделирование распространения радиоволн в трёхмерной магнитоактивной ионосфере, имитируя сильное расслоение ионосферы с помощью чепменовской модели двух слоёв типа  $F_1$  и  $F_2$ . Параметры слоёв приведены в табл. 1, они выбраны

Г. Г. Вертоградов, В. П. Урядов, М. С. Скляревский, В. А. Валов



Рис. 4. То же, что на рис. 1, для 08:45 UT 16.01.2016

для наилучшего согласования расчётов с экспериментом. При вычислениях амплитуды сигнала учитываются нижние слои *D* и *E* ионосферы, параметры которых взяты из модели IRI-2012. Для учёта влияния перемещающихся ионосферных возмущений на УЧХ верхнего и нижнего лучей в модель регулярной ионосферы добавлен локальный горизонтальный градиент электронной концентрации. Градиент в направлении восток—запад в окрестности области отражения составляет 2,5 МГц/100 км, а в направлении юг—север он равен 0,2 МГц/100 км.

Расчёты проводились с помощью имитационной модели декаметрового радиоканала [23]. Результаты моделирования сеанса 08:45 UT 16.01.2016, приведённого на рис. 4, показаны на рис. 5. Маркерами  $1_1$  и  $1_2$  отмечены лучи, отражающиеся от слоёв  $F_1$  и  $F_2$  соответственно; маркерами  $2_1$  и  $2_2$  отмечены верхние лучи, распространяющиеся в окрестностях максимумов слоёв  $F_1$  и  $F_2$ . Заметим, что луч  $1_1$  — это нижний луч, а луч  $1_2$  — это комбинация верхнего и нижнего лучей; часть пути он распространяется как верхний луч для нижнего слоя  $F_1$ , далее проникает в верхний слой  $F_2$  и в нём распространяется как нижний луч. Примеры лучевых траекторий типа  $1_1$ ,  $2_1$ ,  $1_2$  и  $2_2$  на частоте 19,5 МГц показаны на рис. 6.

1000



Таблица 1

Рис. 5. Результаты моделирования ДЧХ (*a*), АЧХ (*b*), частотных зависимостей угла места (*b*) и азимута (*b*) для сеанса зондирования 08:45 UT 16.01.2016 на трассе Кипр—Ростов-на-Дону.  $I_1$  — нижний луч с отражением от слоя  $F_1$ ,  $I_2$  — комбинация верхнего и нижнего лучей (см. рис. 6),  $I_1$  и  $I_2$  — верхние лучи, распространяющиеся в окрестностях максимумов слоёв  $F_1$  и  $F_2$ , соответственно (см. рис. 6)

Как видно из рис. 4 и 5, результаты моделирования ДЧХ, АЧХ и УЧХ хорошо согласуются с экспериментом. Согласно расчётам для западного направления локального градиента  $N_{\rm e}$ , в области отражения имеет место отклонение к западу азимута угла прихода верхних лучей  $2_1$  и  $2_2$  относительно азимута нижнего луча  $1_1$ . Это согласуется с данными, полученными для условий прохождения через трассу зондирования вечернего терминатора, когда за счёт западного направления регулярного градиента  $N_{\rm e}$  имеет место отклонение к западу азимута верхнего луча (см. рис. 3).

Влияние поперечного градиента  $N_{\rm e}$  на трассе распространения на отклонение азимута верхнего луча можно трактовать следующим образом. Известно [24], что верхний луч скользит в окрестности максимума ионосферного слоя вдоль максимума потенциальной функции  $U(z) = -\varepsilon_{\rm MOQ}(z) = -[1 - f_{\rm o}^2(z)/f^2 + 2z/R_{\rm o}]$  и относится к типу «неустойчивых» траекторий, чувствительных к возмущениям и вариациям высотного профиля  $N_{\rm e}(z)$  в окрестности максимума слоя. Здесь  $f_{\rm o}(z) = \omega_{\rm o}(z)/(2\pi)$ ,  $\omega_{\rm o}(z)$  — плазменная частота, f — рабочая частота,  $R_{\rm o}$  — радиус Земли, z — высота над поверхностью Земли.

При наличии поперечного градиента  $f_o(z)$  в области отражения, вызванного прохождением терминатора или перемещающегося ионосферного возмущения, максимум потенциальной функции U(z) смещается в направлении градиента электронной концентрации. В условиях реальной (трёхмерной) ионосферы это будет приводить к проникновению («перетеканию») верхнего луча



Рис. 6. Лучевые траектории на частоте 19,5 МГц на трассе Кипр—Ростов-на-Дону для сеанса 08:45 UT 16.01.2016 в проекции на вертикальную плоскость, проходящую через приёмник и передатчик. Сплошными и штриховыми линиями показаны траектории для волн с обыкновенной и необыкновенной поляризациями соответственно,  $1_1$  — нижний луч с отражением от слоя  $F_1$ ,  $1_2$  — комбинация верхнего и нижнего лучей,  $2_1$  и  $2_2$  — верхние лучи, распространяющиеся в окрестностях максимумов слоёв  $F_1$  и  $F_2$ , соответственно

в окрестность смещённого максимума функции U(z) (где верхний луч распространяется) и отклонению азимута угла прихода верхнего луча в направлении поперечного градиента  $f_0(z)$ , что наблюдается в эксперименте и подтверждается расчётами.

#### выводы

В работе изложено математическое обоснование, алгоритм работы и аппаратная реализация многоканального ЛЧМ-ионозонда-радиопеленгатора, способного, наряду с традиционными информационными характеристиками (АЧХ и ДЧХ), измерять УЧХ на трассе наклонного зондирования.

Впервые на среднеширотной односкачковой трассе с помощью ЛЧМ-ионозонда-радиопеленгатора проведены длительные непрерывные измерения ключевых характеристик ионосферного канала (ДЧХ, АЧХ и УЧХ) во всём диапазоне частот прохождения коротковолновых сигналов.

Высокая чувствительность ЛЧМ-ионозонда-радиопеленгатора применительно к идентификации наличия перемещающегося ионосферного возмущения как по ДЧХ, так и по УЧХ в сочетании с моделированием позволила получить новые данные об особенностях распространения коротковолновых сигналов в условиях перемещающегося ионосферного возмущения.

Выполнен анализ особенностей двумерных УЧХ на меридиональной трассе наклонного зондирования Кипр—Ростов-на-Дону. Показано, что под влиянием перемещающегося ионосферного возмущения типичные вариации угла места составляют около 5°, а пеленга в горизонтальной

плоскости 1°÷3°. Максимальные изменения угла места равнялись 10°, а отклонения пеленга лучей Педерсена достигали 7°÷8°.

Показано, что как регулярные (связанные с терминатором), так и нерегулярные (вызванные прохождением перемещающегося ионосферного возмущения через трассу распространения) поперечные (относительно трассы распространения) горизонтальные градиенты электронной концентрации приводят к отклонению азимута угла прихода верхнего луча в направлении градиента концентрации.

В условиях сильного расслоения ионосферы в окрестности максимума F-области под воздействием перемещающегося ионосферного возмущения на ионограммах наблюдались треки в виде чётко выраженных Z-образований. Проведено имитационное моделирование распространения радиоволн в трёхмерной магнитоактивной ионосфере. Показано, что комбинация регулярного распределения электронной концентрации в виде двух чепменовских слоёв с наложением локальных горизонтальных градиентов  $N_e$  в широтном и долготном направлениях в области отражения, имитирующих влияние перемещающегося ионосферного возмущения, даёт хорошее согласие экспериментальных и расчётных данных.

В заключение отметим, что результаты многолетних исследований на трассах с различной протяжённостью и ориентацией в условиях естественной и искусственно возмущённой ионосферы показывают, что ЛЧМ-ионозонд-радиопеленгатор является мощным инструментом для решения фундаментальных и прикладных задач в области физики ионосферы и распространения радиоволн.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Пат. 2399062 РФ. МПК G01S3/46. Ионосферный зонд-радиопеленгатор. / Вертоградов Г. Г., Урядов В. П., Вертоградов В. Г., Кубатко С. В. Заявл. № 2009127273/28, 15.07.2009. Опубл. 10.09.2010. Бюл. № 25.
- Урядов В. П., Вертоградов Г. Г., Вертоградова Е. Г. // Изв. вузов. Радиофизика. 2013. Т. 56, № 1. С. 1.
- 3. Вертоградов Г. Г., Урядов В. П., Вертоградова Е. Г., Понятов А. А. // Изв. вузов. Радиофизика. 2010. Т. 53, № 3. С. 176.
- Урядов В. П., Вертоградов Г. Г., Вертоградова Е. Г. // Изв. вузов. Радиофизика. 2012. Т. 55, № 4. С. 255.
- Бертоградов Г. Г., Урядов В. П., Вертоградов В. Г. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2013. Т. 56, № 5. С. 287.
- Понятов А. А., Вертоградов Г. Г., Урядов В. П. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2014. Т. 57, № 6. С. 464.
- Вертоградов Г. Г., Вертоградова Е. Г., Урядов В. П. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2012. Т. 55, № 1. С. 1.
- Вертоградов Г. Г., Урядов В. П., Вертоградова Е. Г. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2015. Т. 58, № 5, С. 339.
- Вертоградов Г. Г., Урядов В. П., Вертоградова Е. Г. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2015. Т. 58, № 6. С. 423.
- Erukhimov L. M., Uryadov V. P., Cherkashin Yu. N., et al. // Waves Random Media. 1997. V.7, No. 4. P. 531.
- 11. Вертоградов Г. Г., Урядов В. П., Вертоградов В. Г., Шевченко В. Н. // Электромагнитные волны и электронные системы. 2007. Т. 12, № 5. С. 25.

Г. Г. Вертоградов, В. П. Урядов, М. С. Скляревский, В. А. Валов

- Пат. 2207583 РФ. МПК G01S3/74. Способ пеленгации множества источников радиоизлучения, одновременно попадающих в полосу приёма / Шевченко В.Н., Вертоградов Г. Г., Иванов Н. М., Берсенев Е. В. Заявл. № 2001132504/09, 29.11.2001. Опубл. 27.06.2003. Бюл. № 18.
- Пат. 2190236 РФ. МПК G01S5/04. Способ обнаружения и определения двухмерного пеленга и частоты источников радиоизлучения / Шевченко В. Н., Емельянов Г. С., Вертоградов Г. Г. Заявл. № 2000123589/09, 13.09.2000. Опубл. 27.09.2002. Бюл. № 27.
- 14. Филипп Н. Д., Блаунштейн Н. Ш., Ерухимов Л. М. и др. Современные методы исследования динамических процессов в ионосфере. Кишинев: Штиинца, 1991. 288 с.
- Вертоградов Г. Г., Урядов В. П., Вертоградова Е. Г. // Изв. вузов. Радиофизика. 2008. Т. 51, № 1. С. 10.
- Gething P. J. D. Radio direction-finding and resolution of multicomponent wave-filds. London: Peter Peregrinus Ltd, 1976. 329 p.
- Gething P. J. D. Radio direction finding and superresolution. London: Peter Peregrinus Ltd, 1990. 365 p.
- 18. Мардиа К. Статистический анализ угловых наблюдений. М.: Наука, 1978. 240 с.
- Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ 2001611514 РФ. Программное обеспечение многоканального пеленгатора-дальномера КВ-диапазона / Вертоградов Г. Г., Кондаков Е. В., Шевченко В. Н. Заявл. 13.09.2001; Зарег. 12.11.2001.
- Вертоградов Г. Г., Вертоградов В. Г., Урядов В. П. // Изв. вузов. Радиофизика. 2006. Т. 49, № 12. С. 1015.
- 21. Вертоградов Г. Г., Денисенко П. Ф., Вертоградова Е. Г., Урядов В. П. // Электромагнитные волны и электронные системы. 2008. Т. 13, № 5. С. 35.
- 22. Дэвис К. Радиоволны в ионосфере. М.: Мир, 1973. 502 с.
- 23. Вертоградов Г. Г. // Радиотехника и электроника. 2003. Т. 48, № 11. С. 1 322.
- 24. Гуревич А. В., Цедилина Е. Е. Сверхдальнее распространение коротких радиоволн. М.: Наука, 1979. 248 с.

Поступила в редакцию 21 июня 2016 г.; принята в печать 13 октября 2016 г.

# OBLIQUE SOUNDING OF THE IONOSPHERE BY MEANS OF AN IONOSONDE–DIRECTION FINDER WITH CHIRP SIGNAL

G. G. Vertogradov, V. P. Uryadov, M. S. Sklyarevsky, and V. A. Valov

We give a mathematical rationale, an algorithm, and hardware implementation for a multichannel ionosonde–direction finder with chirp signal. The results of experimental studies of two-dimensional angular frequency characteristics on the Cyprus–Rostov-on-Don meridional oblique-sounding path are presented. It is shown that both regular (related to the terminator) and irregular (caused by the passage of the traveling ionospheric disturbance (TID) through the propagation path) transverse (relative to the propagation path) horizontal gradients of the electron number density lead to a deviation of the azimuth of the high-angle ray in the direction of the  $N_{\rm e}$  gradient. The experimental data are compared with the simulation results.