

УДК 550.388.2

ОДНОПОЗИЦИОННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ИСТОЧНИКОВ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ В ДЕКАМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ С ПОМОЩЬЮ ШИРОКОАПЕРТУРНОГО ПЕЛЕНГАТОРА-ДАЛЬНОМЕРА И ЛЧМ-ИОНОЗОНДА-РАДИОПЕЛЕНГАТОРА

Г. Г. Вертоградов¹, В. П. Урядов^{2,3*}, Е. Г. Чайка¹, В. А. Валов³, Ф. И. Выборнов²,
А. В. Першин², А. С. Стародубровский³

¹ Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону;

² Научно-исследовательский радиотехнический институт ННГУ им. Н. И. Лобачевского,
г. Нижний Новгород;

³ АО «НПП «Полёт», г. Нижний Новгород, Россия

Представлены результаты однопозиционного определения положения источников радиоизлучения на среднеширотной трассе Васильсурск—Ростов-на-Дону с помощью широкоапертурного пеленгатора-дальномера и ионозонда-радиопеленгатора с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ). Изложены способы определения углов прихода в условиях многолучевого приёма радиосигналов. Показано, что при разделении различными методами пеленгования одно- и двухскачковых мод распространения отклонения углов прихода достигают в азимутальной плоскости 5° , а в угломестной 10° , что обусловлено наличием перемещающихся ионосферных возмущений. Установлено, что в условиях спорадического слоя E_s азимут на ЛЧМ-передатчик при усреднении пеленгов по частоте и по сеансам зондирования может быть определён с точностью $0,1^\circ$. При использовании для оценки азимута на ЛЧМ-передатчик регулярных $1F$ и $2F$ мод распространения погрешность в среднем составляет $0,5^\circ$ и $1^\circ \div 2^\circ$ соответственно. Разработан алгоритм решения обратной задачи однопозиционного местоопределения, позволяющий по углам прихода определять координаты источников радиоизлучения с использованием прогностической модели ионосферы IRI-2012 с возможностью её коррекции по данным станции вертикального зондирования в месте расположения приёмного пункта. Показано, что средняя погрешность определения дальности до источников составляет около 13%.

ВВЕДЕНИЕ

Для решения различных научных и практических задач распространения радиоволн в ионосфере весьма актуальными являются задачи обнаружения и определения положения и параметров движения источников радиоизлучения в декаметровом диапазоне длин волн.

В последние годы активно развивается направление полуактивной радиолокации, когда в качестве волны «подсветки» воздушных объектов используются коротковолновые радиосигналы от удалённых вещательных радиостанций [1, 2]. Этот же метод применяется для определения пространственного распределения ионосферных неоднородностей и неровностей земной поверхности с помощью широкополосного коротковолнового радара бистатической конфигурации с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) сигнала [3–5]. Во всех этих исследованиях актуальной является задача позиционирования источников радиоизлучения, в том числе вторичного (рассеянного) излучения от различных объектов (летательных аппаратов, ионосферных неоднородностей и неровностей земной поверхности).

Для однопозиционного определения положения источника излучения в декаметровом диапазоне длин волн достаточно из одного приёмного пункта (одной позиции) измерить углы прихода

* uryadov.vp@nirfi.unn.ru

хотя бы одного луча от источника и знать или задать каким-либо способом ионосферную обстановку (пространственное распределение электронной концентрации). Затем по измеренным углам прихода радиоволны в трёхмерно-неоднородной магнитоактивной ионосфере в приближении геометрической оптики необходимо построить лучевую траекторию принятого сигнала и найти координаты источника [6, 7] как координаты точки пересечения лучевой траекторией поверхности Земли. Однако дискретная многолучевая структура поля декаметровых волн в зоне приёма и нерегулярная пространственная и временная изменчивость ионосферы существенно усложняют решение этой задачи и могут давать большие погрешности определения координат источника при построении лучевых траекторий принимаемых сигналов [6, 8–10].

При определении координат источника радиоизлучения необходимо совместно учитывать все три определяющих фактора: горизонтальную глобальную неоднородность ионосферы, геомагнитное поле и среднемасштабные квазипериодические структуры типа перемещающихся ионосферных возмущений. Медианное состояние спокойной ионосферы достаточно хорошо предсказывается. Например, пространственное распределение электронной концентрации, необходимое для построения лучевой траектории, может быть найдено на основе современной адаптивной модели IRI-2012 [11]. Однако достоверные модели перемещающихся ионосферных возмущений и прогнозы их параметров в настоящее время отсутствуют. Как следствие, даже при точных измерениях двумерных углов прихода коротковолновых сигналов, определение географических координат источников будет связано со случайными погрешностями, значения которых экспериментально оценены только на ограниченном числе радиотрасс в узких временных рамках (см., например, работы [12–15]). Ситуация усложняется также тем, что в современных угломерно-дальномерных комплексах не всегда предпринимают меры для разделения парциальных лучей, формирующих поле декаметровых волн в зоне приёма. В результате при экспериментальной оценке координат источников однопозиционным методом основной вклад в погрешности вносят интерференционные ошибки [16, 17]. При этом влияние среды и потенциальные ограничения точности однопозиционного метода, связанные с особенностями распространения декаметровых волн в ионосфере, выделить трудно.

Цель данной работы состоит в том, чтобы в ходе специально поставленных экспериментов с использованием разных радиофизических методов измерить вариации углов прихода всевозможных мод распространения коротковолновых сигналов на среднеширотной трассе Васильсурск (Нижегородская обл.)—Ростов-на-Дону; экспериментально оценить погрешности однопозиционного метода определения дальности до источника излучения при различных способах задания ионосферной обстановки в условиях разделения поля декаметровых волн на парциальные лучи и оценить возможности пространственного позиционирования неизвестных ЛЧМ-передатчиков.

1. СПОСОБЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УГЛОВ ПРИХОДА В УСЛОВИЯХ МНОГОЛУЧЕВОГО ПРИЁМА

В настоящее время, несмотря на развитые методы временного и пространственного спектрального анализа [12, 17–22], не существует способа, который бы однозначно обеспечивал разделение многолучевого поля коротких волн на парциальные лучи и вычисление их двумерных угловых координат. Это обусловлено несколькими причинами, из которых перечислим только основные: лучи, формирующие поле радиоволн, не являются полностью некогерентными, особенно на малых выборках, а помехи не всегда можно считать белым шумом; параметры парциальных лучей (амплитуды, фазы, углы прихода) изменяются во времени с характерными масштабами, не превышающими 10–30 с; поле в зоне приёма формируется не только дискретными лучами, но также рассеянием на неоднородностях различной природы и размеров; количество лучей распростра-

нения, которые можно чётко выделить, меняется со временем; диффузность парциальных мод возрастает с увеличением их порядка, а угловое расстояние между модами уменьшается при увеличении протяжённости трассы; обыкновенные и необыкновенные лучи одной моды в большинстве случаев имеют малое угловое различие. Под парциальными модами понимаются однокосачковые, двухкосачковые и т. д. моды распространения с отражением от различных слоёв ионосферы. Учитывая всё сказанное, для разделения поля коротких волн на парциальные лучи и моды в работе были использованы два способа, предполагающие одновременно спектральную обработку во временной и пространственной областях. Первый способ основывался на методе MUSIC с предварительной частотно-временной обработкой, локализацией и выделением принимаемых сигналов в спектральной области [15, 20]. При использовании второго способа сначала парциальные лучи разделялись по групповой задержке на основе использования непрерывных ЛЧМ-сигналов, а затем проводился пространственный спектральный анализ для определения углов прихода [23].

Остановимся кратко на обоих способах.

С каждого из N элементов антенной решётки в полосе приёма радиоприёмного устройства (РПУ) после квадратурной дискретизации с частотой F_d накапливается выборка из K комплексных отсчётов. После ввода комплексного сигнала с заданной длительностью выполняются N преобразований Фурье, в результате чего формируется матрица сигнальных спектральных отсчётов $\{s_{nk}\}$, где $k = 0, 1, \dots, K-1$, $n = 0, 1, \dots, N-1$. Усреднением статистически независимых спектральных плотностей мощности по всем приёмным каналам получается состоятельная оценка спектральной плотности мощности сигналов в полосе РПУ по формуле $\bar{s}_k = \sum_{n=0}^{N-1} |s_{nk}|^2 / N$. По величине $\bar{s}_k$ гистограммным способом определяется спектральная плотность мощности шума s_N [22]. Далее выполняется обнаружение парциальных сигналов в полосе приёма и определение пространственных корреляционных матриц их амплитудно-фазовых распределений. Для этого по средней спектральной плотности мощности $\bar{s}_k$ находится положение глобального максимума, номер которого обозначим через $k_{0 \max}$. Отсчёты $s_{nk_{0 \max}}$ принимаются за вектор-столбец текущего амплитудно-фазового распределения $\mathbf{s}_o = \{s_{nk_{0 \max}}\}$ сигнала с номером $o = 0$ (пространственный индекс). Внешнее произведение [20] вектора $\mathbf{s}_o$ даёт невзвешенную оценку пространственной корреляционной матрицы амплитудно-фазовых распределений $\mathbf{S}_o = \mathbf{s}_o \mathbf{s}_o^H$ (индекс «H» обозначает эрмитово сопряжение). Очевидно, что на этом шаге ранг матрицы $\mathbf{S}_o$ равен 1.

Для частотно-временной локализации принимаемого сигнала вычисляется модуль дискретной функции взаимной частотной корреляции $|R_k|$ вектора $\mathbf{s}_o$ с векторами на соседних спектральных отсчётах усреднением в пространственной области (по апертуре антенной решётки) по формуле

$$|R_k| = \left| \frac{\sum_{n=0}^{N-1} s_{on} s_{nk}^*}{\sqrt{\sum_{n=0}^{N-1} |s_{on}|^2 \sum_{n=0}^{N-1} |s_{nk}|^2}} \right|,$$

где $k = k_{0 \max} \pm 1, k_{0 \max} \pm 2, \dots$, звёздочка обозначает комплексное сопряжение. Спектральные составляющие с k -ой дискретной частотой считаются принадлежащими сигналу с номером o , если $|R_k| > 1 - \varepsilon$, где величина порога $1 - \varepsilon$ отличается для двух использованных способов и уточнена ниже. В случае $|R_k| > 1 - \varepsilon$ для каждого вектор-столбца $\mathbf{s}_k = \{s_{nk}\}$ вычисляется матрица $\mathbf{S}_k = \mathbf{s}_k \mathbf{s}_k^H$, которая добавляется к текущей матрице $\mathbf{S}_o$. Как следствие, пространственная корреляционная матрица $\mathbf{S}_o$ усредняется по полосе частот, занятой обнаруженным парциальным сигналом. Отметим, что каждая операция усреднения (в предположении некоррелируемости шумов для соседних дискретных частот) увеличивает ранг матрицы $\mathbf{S}_o$. При этом в обработке не

участвуют спектральные отсчёты с номерами k , для которых выполнено неравенство $\bar{s}_k < s_N + 10$ дБ. Действия продолжаются при других значениях $o = 1, 2, 3, \dots$ без учёта уже обработанных дискретных спектральных отсчётов до тех пор, пока все необработанные отсчёты $\bar{s}_k$ не оказываются меньше среднего уровня $s_N + 10$ дБ. В результате находятся O пространственных эрмитовых корреляционных $N \times N$ матриц $\mathbf{S}_o$ ($o = 0, \dots, O - 1$), ранг которых всегда больше 1.

Количество найденных парциальных сигналов уточняется путём объединения сигналов, коррелируемых в пространственной области. При этом для каждой пары пространственных эрмитовых корреляционных $N \times N$ матриц $\mathbf{S}_{o1}$ и $\mathbf{S}_{o2}$ по формуле

$$R_{o1 o2} = \frac{\left| \sum_{i,j=0}^{N-1} S_{o1ij} S_{o2ij}^* \right|}{\sqrt{\sum_{i,j=0}^{N-1} S_{o1ij} S_{o1ij}^* \sum_{i,j=0}^{N-1} S_{o2ij} S_{o2ij}^*}} \quad (1)$$

вычисляется функция пространственной взаимной корреляции. При превышении этой величиной заданного порога $(1 - \varepsilon)$ матрицы $\mathbf{S}_{o1}$, $\mathbf{S}_{o2}$ считаются коррелируемыми по пространственному индексу o , т. е. принадлежащими одному сигналу, и складываются, а количество различных обнаруженных сигналов O уменьшается на единицу. Такая процедура применяется до тех пор, пока все пространственные корреляционные матрицы $\mathbf{S}_o$ не станут некоррелируемыми по индексу o и, соответственно, количество обнаруженных сигналов O перестанет изменяться. Кроме матрицы $\mathbf{S}_o$, для каждого обнаруженного сигнала дополнительно вычисляются его полоса $\Delta F_o = F_d(k_{\max} - k_{\min})/K$ (здесь $k_{\max}$ и $k_{\min}$ — максимальный и минимальный индексы спектральных отсчётов, принадлежащих данному сигналу, соответственно), энергия сигнала $E_o = \sum_k \bar{s}_k$ и его средневзвешенная частота $\bar{F}_o = F_d(\sum_k k \bar{s}_k)/(K E_o)$. При этом везде суммирование по k распространяется только на индексы спектральных отсчётов, принадлежащих сигналу с номером o .

Первый подход предполагает также повторение описанных операций для нескольких последовательных порций информации с антенн. Вновь найденные для каждой порции информации пространственные корреляционные матрицы $\mathbf{S}_o$ сравниваются с предыдущими. Те из них, которые удовлетворяют критерию превышения функцией пространственной взаимной корреляции (1) по индексу o заданного порога, усредняются. Усредняются также энергии, средневзвешенные частоты и полосы пространственно близких по корреляционному критерию сигналов. Те сигналы, для которых матрицы $\mathbf{S}_o$ не объединяются по указанному критерию ни с одной из найденных матриц на очередном по времени шаге получения данных, считаются прекратившими существование, и их пространственные корреляционные матрицы $\mathbf{S}_o$ направляются на пространственную обработку, а время окончания сигнала фиксируется. Тем сигналам, матрицы $\mathbf{S}_o$ которых не объединяются по указанному критерию ни с одной из ранее найденных матриц, присваивается статус новых сигналов и фиксируется время их начала.

При втором подходе, когда пеленгуются непрерывные сигналы ЛЧМ-зондирования, временное усреднение пространственных корреляционных матриц $\mathbf{S}_o$ невозможно. Таким образом, в данном случае остаётся только описанное выше частотное усреднение матриц $\mathbf{S}_o$ в окрестности частоты каждого парциального луча. При этом, в силу метода наклонного ЛЧМ-зондирования, частота каждого парциального луча, найденная по спектральной плотности мощности разностного сигнала, соответствует его групповой задержке [23].

На пространственную обработку при первом подходе, т. е. собственно пеленгование, направляются матрицы $\mathbf{S}_o$ тех сигналов, которые либо прекратили существование, либо существуют заданное (обычно 16) число циклов получения информации с антенных элементов. При втором подходе пеленгование выполняется по матрицам $\mathbf{S}_o$, усреднённым только в частотной области.

Временное усреднение здесь невозможно, т. к. сеанс ЛЧМ-зондирования занимает слишком большой промежуток времени. В свою очередь, углы прихода парциальных лучей находятся для каждого отдельного сеанса на всех частотах от наименьшей до максимальной наблюдаемой частоты. Отметим, что ранг матрицы $\mathbf{S}_o$ после процедур частотного и временного усреднения для первого подхода и частотного для второго всегда больше N . Как следствие, пространственная обработка может быть выполнена методами как классического спектрального анализа, так и методами высокого спектрального разрешения с выделением сигнального или шумового подпространств.

Пространственная обработка корреляционных матриц $\mathbf{S}_o$ проводилась для оценки двумерных угловых координат (пеленга и угла места) прихода парциальных лучей от контролируемого источника и выполнялась на основе численного построения диаграммы направленности антенной решётки одним из перечисленных ниже методов. При этом для модельного направления, заданного азимутальным углом α и углом места Δ , вычисляется комплексный вектор наведения $\mathbf{V} = \{\exp[i(2\pi/c)\bar{F}r_n], \cos \Delta, \cos(\alpha_n - \alpha)\}$, где c — скорость света, $\bar{F}$ — средневзвешенная частота сигнала (индекс сигнала опускаем, но подразумеваем), r_n , α_n — полярные координаты антенных элементов относительно любой из антенн, которая выбрана в качестве опорной.

При первом способе оценки углов прихода применялся метод MUSIC [12, 20]. Для формирования пространственной корреляционной матрицы $\mathbf{S}_o$ сигнал с антенн оцифровывался в полосе 10 кГц с частотой дискретизации 20 кГц, длина временной выборки комплексного сигнала составляла 1024 отсчёта, количество усреднений матриц по времени было всегда 16. Параметр $1 - \varepsilon$ в процедуре обнаружения и локализации выбирался равным 0,5, что обеспечивало формирование за время усреднения только одной матрицы для всех парциальных лучей. Матрица $\mathbf{S}_o$ формировалась за 0,82 с. При пространственной спектральной оценке с высоким разрешением для выделения сигнального или шумового подпространств решалась задача на собственные значения матрицы $\mathbf{S}_o \mathbf{W}_n = \lambda_n \mathbf{W}_n$, где λ_n — действительные собственные значения, упорядоченные в порядке убывания, $\mathbf{W}_n$ — собственные векторы, $n = 0, 1, \dots, N - 1$. Двумерные углы прихода каждого луча вычислялись на основе минимизации цифровой диаграммы направленности $D(\alpha, \Delta)$, сформированной по правилу

$$D(\alpha, \Delta) = \frac{\sum_{n=0}^{N-N_{\min}-1} |(\mathbf{W}_n^H \mathbf{V})|^2}{(N - N_{\min}) |\mathbf{V}|^2 \sum_{n=0}^{N-N_{\min}-1} |\mathbf{W}_n|^2}. \quad (2)$$

При этом количество сигнальных собственных векторов $N_{\min}$ определялось по критерию $\lambda_{N_{\min}}/\lambda_0 < 0,1$, $N_{\min} \geq 2$.

При втором способе [4, 23, 24] оценки углов прихода парциальных лучей на основе разделения по групповой задержке сигнал с антенн оцифровывался в полосе разностного сигнала 10 кГц с частотой дискретизации 20 кГц, усреднение матриц $\mathbf{S}_o$ по времени не выполнялось. При этом длина выборки сигналов с антенных элементов выбиралась так, чтобы полоса анализируемого ЛЧМ-сигнала составляла приблизительно 40 кГц. Параметр $1 - \varepsilon$ в процедуре обнаружения и локализации по частоте выбирался равным 0,95, что обеспечивало формирование для одной временной выборки нескольких матриц по числу парциальных лучей, отличающихся средней частотой в спектре разностного сигнала, т. е. групповой задержкой. По матрице $\mathbf{S}_o$ каждого луча выполнялся цифровой синтез комплексной диаграммы направленности, определяемой соотношением

$$D(\alpha, \Delta) = \frac{|\mathbf{V}^H \mathbf{S} \mathbf{V}|^2}{|\mathbf{V}|^4 \sum_{i,k=0}^{N-1} |S_{ik}|^2}. \quad (3)$$

Двумерные угловые координаты каждого луча находились по максимуму функции $\text{Re } D(\alpha, \Delta)$. Соответственно, угловые координаты каждого луча вычислялись в интервале от наименьшей до максимальной наблюдаемой частоты с шагом по частоте приблизительно 40 кГц.

2. АППАРАТУРА И УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Верификация разработанных алгоритмов проводилась на среднеширотной трассе Васильсурск ($56,1^\circ$ с. ш., $46,1^\circ$ в. д.)—Ростов-на-Дону ($47,3^\circ$ с. ш., $39,7^\circ$ в. д.) с протяжённостью 1078 км, азимут на передатчик из приёмного пункта составлял $21,2^\circ$. Схема эксперимента показана на рис. 1. Были использованы два программно-аппаратных комплекса измерения углов прихода: многоканальный широко-апертурный комплекс измерения углов прихода дециметровых волн (алгоритм функционирования описан в работах [12, 22]) и ЛЧМ-ионозонд-радиопеленгатор (подробное описание алгоритма функционирования приведено в работах [4, 23, 24]). Оба комплекса работали от одной антенной решётки, которая состояла из 16 активных антенных элементов высотой 2,5 м с произвольной пространственной конфигурацией, размещённых на площадке 100×100 м. Сигнал каждой из антенн решётки разветвлялся с помощью усилителя-разветвителя на два направления. Приём осуществлялся в обоих комплексах синхронно с помощью 16-канального когерентного РПУ с преобразованием частоты. Оцифровка сигналов промежуточной частоты каждого канала выполнялась с помощью когерентного 16-канального аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Стабильность задающего генератора многоканальных РПУ и синтезатора частоты дискретизации многоканальных АЦП обеспечивалась рубидиевым стандартом. Антенно-фидерный тракт при перестройке на частоту принимаемого сигнала для комплекса пеленгатора-дальномера предварительно автоматически калибровался таким образом, что максимальная абсолютная фазовая неидентичность каналов не превышала 3° , а абсолютная амплитудная неидентичность каналов была менее 2%. Антенно-фидерный тракт ЛЧМ-ионозонда-радиопеленгатора калибровался автоматически не реже одного раза в четыре часа в промежутках между сеансами зондирования.

Управление РПУ и АЦП, а также цифровая обработка сигналов с целью извлечения информационных параметров осуществлялась с помощью многопроцессорного компьютера, временная синхронизация которого с мировым временем обеспечивалась с помощью GPS.

Экспериментальные исследования проводились в два этапа, первый — 7 и 8 декабря 2016 года и второй — 8 и 9 февраля 2017 года. В качестве контролируемого источника использовался собственный передатчик, размещённый в п. Васильсурск Нижегородской обл. Передатчик работал в двух режимах: периодическое излучение непрерывного ЛЧМ-сигнала с нулевой минуты часа с периодом зондирования 2 мин в диапазоне $3 \div 17$ МГц со скоростью перестройки частоты 200 кГц/с и непрерывное излучение несущего колебания последовательно на различных частотах. В первом



Рис. 1. Схема эксперимента: трасса наклонного зондирования Васильсурск (Нижегородская обл.)—Ростов-на-Дону

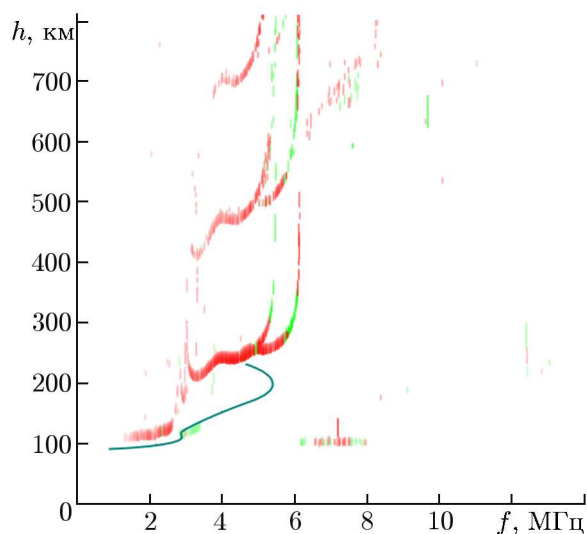


Рис. 2. Пример ионограммы вертикального зондирования, полученный на ионосферной станции г. Ростова-на-Дону RV149 [25] 09:30 UT 09.02.2017

Наблюдения проходили в умеренно спокойной магнитной обстановке: индекс $K_p \leq 2 \div 3$, 8 декабря 2016 года отмечалось небольшое возмущение геомагнитного поля с $K_p = 4$.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И МОДЕЛИРОВАНИЯ

Обработка результатов измерений углов прихода проводилась по различным методикам для режима излучения на несущих частотах и режима излучения ЛЧМ-сигнала.

3.1. Режим непрерывного излучения на фиксированных несущей частотах

В режиме непрерывного излучения монохроматического сигнала моды распространения разделялись по углам прихода на основе пеленгования методом MUSIC. Для каждого дня получено по несколько сотен значений для углов прихода монохроматической волны для различных мод распространения. По этим данным построены гистограммы распределений углов прихода, которые показаны на рис. 3–7 для различных временных интервалов и рабочих частот. Гистограммы распределений на каждом временном интервале позволили определить наиболее вероятные углы прихода парциальных мод распространения и среднеквадратичные отклонения относительно наиболее вероятного угла места и относительно истинного азимута на передатчик.

Идентификация мод распространения выполнена на основе математического моделирования ионосферного радиоканала [26, 27] на тестируемой трассе с использованием прогностического пространственного распределения электронной концентрации, полученного с помощью модели ионосферы IRI-2012 [11]. Общепринятые обозначения мод распространения приведены на гистограммах.

На рисунках показаны гистограммы углов прихода одновременно для всех мод распространения. Тем не менее, гистограммы углов места позволяют идентифицировать моды различной кратности. Детальная идентификация углов прихода по модам распространения осуществлялась следующим способом. По измеренным углам прихода решалась обратная задача однопозиционного определения местоположения с использованием прогностической модели IRI-2012. Для этого

цикле измерений излучение осуществлялось интервалами по 3 мин последовательно на частотах 5 750; 6 720 и 8 060 кГц с перерывами в 1 мин для перестройки частоты. Мощность передатчика составляла 300 Вт. Во втором цикле измерений излучение осуществлялось интервалами по 10 мин последовательно на частотах 8 060 и 6 720 кГц с перерывом в 2 мин для перестройки частоты. Мощность передатчика составляла 400 Вт. За время экспериментов сеансы ЛЧМ-зондирования проводились в дневной период с 06:00 до 14:00 UT, а сеансы непрерывного излучения несущего колебания — в полуденные часы суток.

Состояние ионосферы контролировалось по данным станции вертикального зондирования «Парус» в г. Ростове-на-Дону [25]. Пример ионограммы вертикального зондирования для эксперимента 9 февраля 2017 года показан на рис. 2.

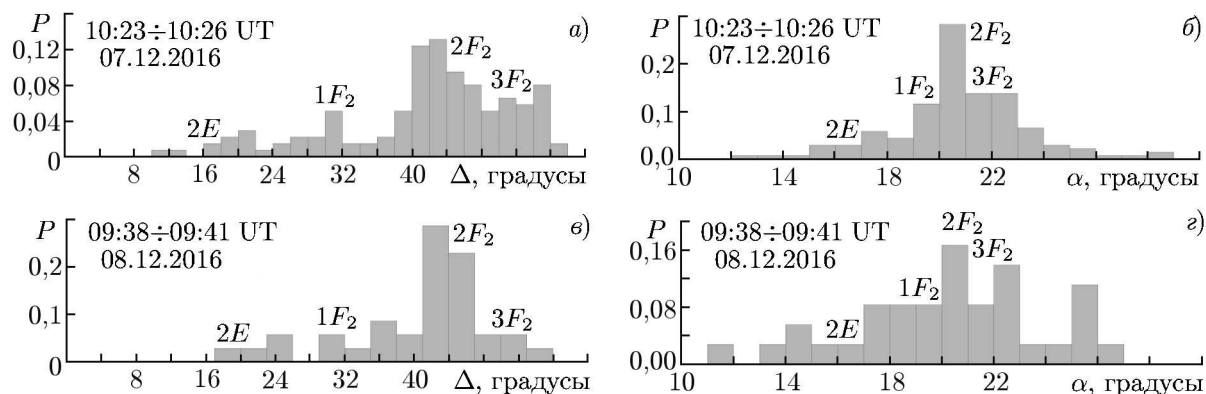


Рис. 3. Гистограммы распределения углов прихода на частоте 5 750 кГц для трассы Васильсурск—Ростов-на-Дону при приёме монохроматического сигнала

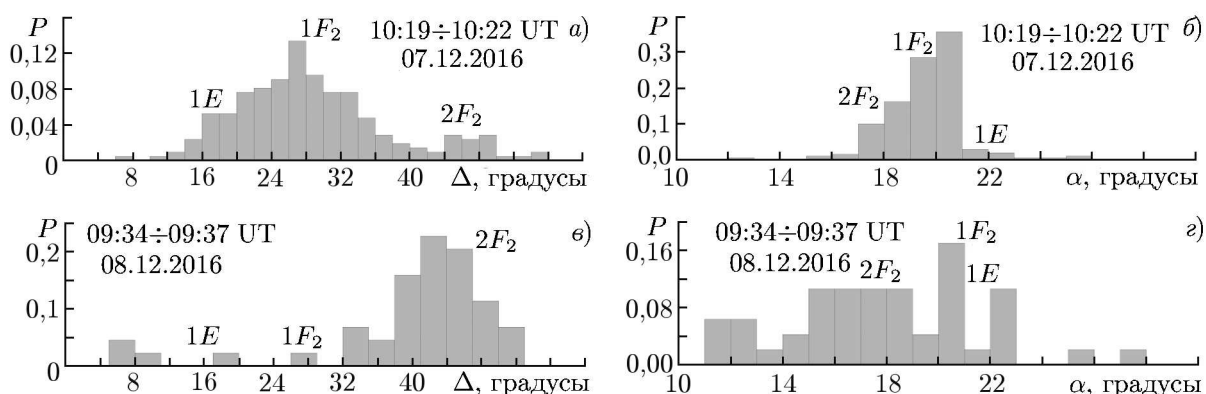


Рис. 4. Гистограммы распределения углов прихода на частоте 6 720 кГц для трассы Васильсурск—Ростов-на-Дону при приёме монохроматического сигнала

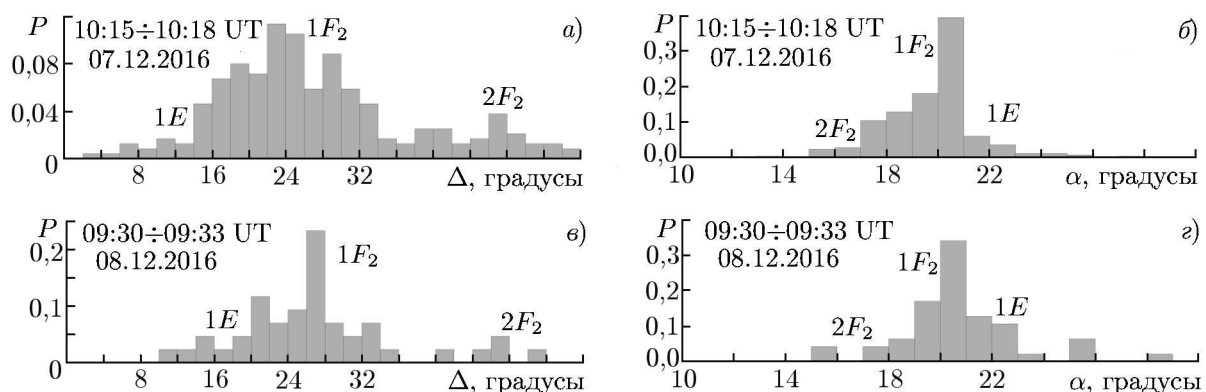


Рис. 5. Гистограммы распределения углов прихода на частоте 8 060 кГц для трассы Васильсурск—Ростов-на-Дону при приёме монохроматического сигнала

из точки приёма для каждого из измеренных углов прихода строилась многоскачковая лучевая траектория в неоднородной магнитоактивной ионосфере. Вычислялась дальность до источника для одно-, двух- и трёхскачковых траекторий обыкновенных и необыкновенных мод распространения. Относительно точки географического расположения источника (Васильсурск) устанавли-

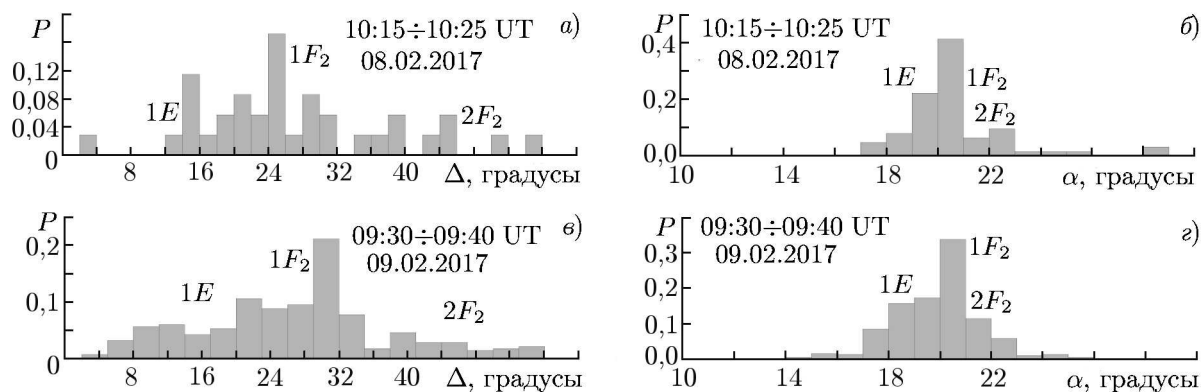


Рис. 6. Гистограммы распределения углов прихода на частоте 6 720 кГц для трассы Васильсурск—Ростов-на-Дону при приёме монохроматического сигнала

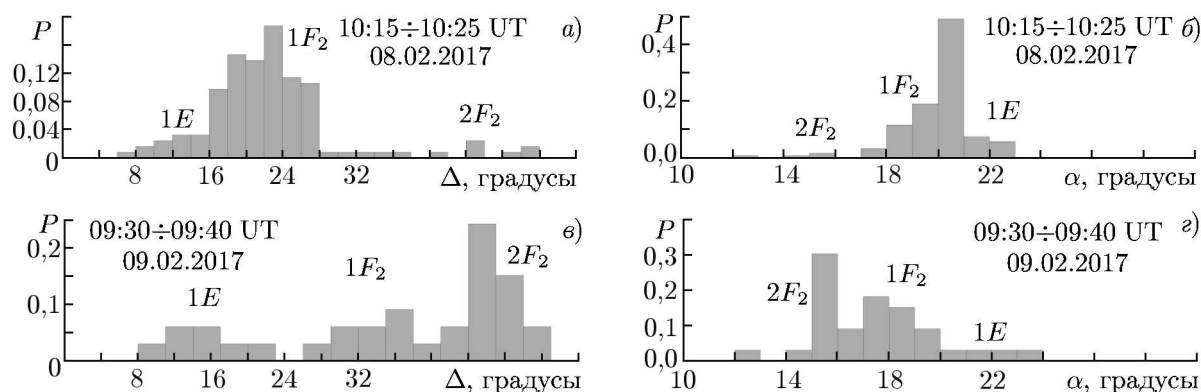


Рис. 7. Гистограммы распределения углов прихода на частоте 8 060 кГц для трассы Васильсурск—Ростов-на-Дону при приёме монохроматического сигнала

вался доверительный интервал $\pm 20\%$ по дальности и $\pm 10^\circ$ по азимуту. Идентификация моды распространения осуществлялась по признаку попадания точки пересечения лучевой траектории с земной поверхностью для соответствующего скачка какой-либо магнитоионной компоненты в указанную доверительную область. При этом идентификация мод E или F осуществлялась по высоте отражения на каждом скачке при построении лучевой траектории в прогнозируемой ионосфере.

По гистограммам можно проследить вариации углов прихода мод различной кратности не только в вертикальной (угол места Δ), но и в азимутальной плоскости (пеленг прихода радиоволны α). Согласно полученным данным, гистограммы односкачковых мод распространения имеют значительную ширину. Это обусловлено тем, что односкачковый сигнал формируется в результате интерференции нескольких мод распространения, прежде всего обыкновенной ($1F_o$) и необыкновенной ($1F_x$) мод. При этом углового разрешения недостаточно для разделения односкачковых мод обыкновенной и необыкновенной поляризаций. Как следствие, диапазон вариаций углов места односкачковых мод $1F_2$ на исследуемой трассе занимает интервал $20^\circ \div 32^\circ$. Изменения угла прихода в азимутальной плоскости достигают $4^\circ \div 5^\circ$. Даже при селекции углов прихода волны по моде распространения как углы места, так и азимуты прихода лучей отдельных мод распространения имеют существенный разброс. Это объясняется особенностями квазипериодических вариаций пространственного распределения ионизации в ионосфере под влиянием перемещающихся

ионосферных возмущений. Влияние таких возмущений на углы прихода будет проиллюстрировано ниже. Ещё в большей степени влияние возмущений существенно для углов места и азимутов прихода двухскачковых и трёхскачковых мод распространения $2F_2$, $3F_2$.

После описанной процедуры селекции всё множество измеренных углов прихода было сортировано по модам распространения. Для каждой моды и каждого сеанса измерений оценены следующие характеристики: средний угол места $\langle\Delta\rangle$ и его среднеквадратичное отклонение σ_Δ ; средний азимут прихода волны $\langle\alpha\rangle$ и среднеквадратичное отклонение азимута от истинного направления из точки приёма на передатчик σ_α . Результаты приведены для обоих этапов эксперимента в табл. 1 и 2. Для каждой из контролируемых частот указано среднее за сеанс измерений отношение сигнал/шум (ОСШ) в полосе, согласованной с сигналом. С увеличением частоты ОСШ возрастает, его минимальное значение 9,4 дБ соответствует самой низкой частоте 5 720 кГц. В связи с этим на данной частоте наблюдаются максимальные вариации углов прихода: $\sigma_\Delta \approx 3,5^\circ$, $\sigma_\alpha \approx 3,0^\circ$ (для всех многоскачковых мод). При этом вариации углов прихода практически не зависят от порядка моды; это связано с тем, что они обусловлены погрешностями измерений углов прихода при малом ОСШ. Этими же причинами объясняются часто получаемые большие значения σ_Δ и σ_α для $1E$ моды, которая не является основной на более высоких частотах. Как следствие, ОСШ для моды $1E$ примерно на 10 дБ меньше средних значений, приведённых в таблицах. Инструментальная погрешность σ_α для моды $1F_2$ оставляет $1,0^\circ \div 1,5^\circ$. Для моды $2F_2$ среднеквадратичные отклонения в азимутальной плоскости примерно в два раза больше. Для моды $1F_2$ вариации угла места характеризуются $\sigma_\Delta \approx 1,6^\circ \div 3,5^\circ$, для моды $2F_2$ — большими значениями $\sigma_\Delta \approx 3,6^\circ \div 5,5^\circ$. Увеличение вариаций азимута для кратных мод распространения обусловлено двумя факторами: первый связан, как будет показано ниже, с влиянием на углы прихода перемещающихся ионосферных возмущений; второй — с отражением от неровной (не горизонтальной) земной поверхности. Существенные значения σ_Δ , по нашему мнению, обусловлены интерференцией неразделённых обыкновенной и необыкновенной мод распространения и влиянием перемещающихся ионосферных возмущений.

После селекции результатов измерений углов прихода по модам распространения для каждой моды решалась обратная задача для оценки координат источника радиоизлучения. Для этого по модели IRI-2012 на основе трёхмерной сплайн-аппроксимации, обеспечивающей непрерывность функции вместе с её производными до второго порядка включительно, восстанавливалось пространственное распределение электронной концентрации по широте, долготе и высоте с шагом по времени 15 мин. Измеренные углы прихода отдельных мод распространения использовались для построения многоскачковой лучевой траектории на основе решения характеристических уравнений, записанных для магнитоактивной трёхмерно-неоднородной модельной ионосферы. Координаты точки пересечения соответствующего скачка лучевой траектории с поверхностью Земли (азимут трассы α , расстояние до источника S) принимались за оценочное место расположения источника. В табл. 1 и 2 также приведены средние значения дальности $\langle S \rangle$, среднеквадратичное отклонение дальности от локального среднего значения σ_S и относительное среднеквадратичное отклонение расстояния до источника δS от истинного значения S_0 .

Понятно, что величина δS обуславливается как вариациями дальности под влиянием различных динамических процессов в ионосфере, так и локальными систематическими смещениями кажущегося расположения источника под действием отклонения модельного пространственного распределения ионизации в ионосфере от истинного. Из таблиц видно, что погрешность однопозиционной оценки дальности на основе прогностической модели ионосферы IRI-2012, как правило, не превышает 19 %. В табл. 3 приведены усреднённые значения относительной погрешности однопозиционной оценки дальности до источника по всем этапам эксперимента для различных мод распространения. Полученные значения хорошо согласуются с результатами работы [12], в ко-

Таблица 1. Результаты оценки углов прихода и дальности до источника при излучении монохроматических сигналов (1-й этап, 7–8 декабря 2016 года)

$f = 5\,720$ кГц, ОСШ = 9,4 дБ										
мода	$\langle\Delta\rangle$, градусы	σ_Δ , градусы	$\langle\alpha\rangle$, градусы	σ_α , градусы	$\langle S\rangle$, км	σ_s , км	δS , %	$\langle S^{(c)}\rangle$, км	$\sigma_s^{(c)}$, км	$\delta S^{(c)}$, %
2E	16,3	3,1	18,2	2,9	—	—	—	1 236,9	26,0	14,9
1F ₂	27,4	4,1	20,7	2,6	—	—	—	964,0	67,3	12,3
2F ₂	42,4	3,2	21,9	2,8	919,1	93,8	17,2	1 010,5	80,3	9,8
3F ₂	50,5	3,6	21,5	3,4	1 117,0	117,3	11,4	1 156,3	74,6	10,0
$f = 6\,720$ кГц, ОСШ = 16,0 дБ										
мода	$\langle\Delta\rangle$, градусы	σ_Δ , градусы	$\langle\alpha\rangle$, градусы	σ_α , градусы	$\langle S\rangle$, км	σ_s , км	δS , %	$\langle S^{(c)}\rangle$, км	$\sigma_s^{(c)}$, км	$\delta S^{(c)}$, %
1E	13,4	3,9	20,0	2,3	1 079,4	143,6	13,3	1 084,8	145,1	13,5
1F ₂	25,9	3,8	20,3	1,1	900,1	66,0	17,6	1 065,9	121,6	11,3
2F ₂	42,3	5,4	18,9	3,1	1 003,2	136,3	14,4	1 122,0	130,3	12,7
$f = 8\,060$ кГц, ОСШ = 24,5 дБ										
мода	$\langle\Delta\rangle$, градусы	σ_Δ , градусы	$\langle\alpha\rangle$, градусы	σ_α , градусы	$\langle S\rangle$, км	σ_s , км	δS , %	$\langle S^{(c)}\rangle$, км	$\sigma_s^{(c)}$, км	$\delta S^{(c)}$, %
1E	12,9	3,6	23,1	3,0	1 031,7	122,0	12,1	1 002,8	106,6	12,1
1F ₂	26,1	4,4	20,7	1,4	922,9	83,4	16,5	1 008,8	98,9	11,2
2F ₂	46,1	4,5	18,2	2,6	1 029,5	87,1	9,3	1 205,0	30,3	12,0

Таблица 2. Результаты оценки углов прихода и дальности до источника при излучении монохроматических сигналов (2-й этап, 8–9 февраля 2017 года)

$f = 6\,720$ кГц, ОСШ = 13,6 дБ										
мода	$\langle\Delta\rangle$, градусы	σ_Δ , градусы	$\langle\alpha\rangle$, градусы	σ_α , градусы	$\langle S\rangle$, км	σ_s , км	δS , %	$\langle S^{(c)}\rangle$, км	$\sigma_s^{(c)}$, км	$\delta S^{(c)}$, %
1E	11,3	2,9	20,1	1,5	882,5	168,0	23,8	1 034,7	128,7	12,6
1F ₂	25,5	1,8	21,0	1,7	820,6	98,3	25,6	1 071,8	124,6	11,5
2F ₂	39,2	6,5	20,8	2,8	1 033,4	164,7	15,7	1 059,7	108,1	10,2
$f = 8\,060$ кГц, ОСШ = 24,9 дБ										
мода	$\langle\Delta\rangle$, градусы	σ_Δ , градусы	$\langle\alpha\rangle$, градусы	σ_α , градусы	$\langle S\rangle$, км	σ_s , км	δS , %	$\langle S^{(c)}\rangle$, км	$\sigma_s^{(c)}$, км	$\delta S^{(c)}$, %
1E	16,2	3,8	21,4	1,2	1 051,1	129,4	12,3	985,7	97,2	12,4
1F ₂	23,0	1,6	20,7	0,7	878,5	51,3	19,2	1 036,0	108,7	10,8
2F ₂	46,8	3,4	15,5	3,1	1 042,3	39,7	4,9	—	—	—

торой найдены аналогичные оценки погрешности однопозиционного определения дальности для других среднеширотных трасс с протяжённостью от 1 000 до 3 000 км, а также с работами [13, 14] для австралийского региона. По результатам многолетних измерений на различных частотах на трассах разной протяжённости и ориентации значение 15 % следует признать типичным при условии использования прогностических моделей ионосферы и разделения многолучевого поля на парциальные составляющие.

Погрешности однопозиционной оценки дальности $12 \div 15\%$ обусловлены, на наш взгляд, двумя факторами. Первый фактор — это отклонение реального профиля электронной концентрации $N(h)$ от получаемого по модели IRI-2012, особенно в нижней части слоя F_2 , которое можно пытаться уменьшить привлечением данных текущей диагностики ионосферы. Второй фактор — это влияние перемещающихся ионосферных возмущений, которое не может быть потенциально уменьшено, т. к. достоверных прогностических моделей возмущений и средств текущей диагностики их параметров в настоящее время не существует.

Таблица 3. Средние ошибки оценки дальности до источника по модам распространения за два этапа измерений

мода	δS , %	$\delta S^{(c)}$, %
1E	15,3	12,6
2E	—	14,9
1F ₂	19,7	11,4
2F ₂	12,3	11,2
3F ₂	11,4	10,0

3.2. Адаптация ионосферной модели и задача однопозиционного определения положения источника

В работе рассмотрена возможность уменьшения погрешностей однопозиционного определения местоположения путём адаптации ионосферной модели по данным текущей диагностики ионосферы на основе вертикального зондирования. Для подобных исследований оптимально подходила станция вертикального зондирования «Парус» в г. Ростов-на-Дону (RV149), к результатам измерений которой имеется общий доступ [25]. В силу особенностей модели ионосферы IRI-2012 вычисляемое высотное распределение электронной концентрации (профиль $N(h)$) в заданной точке расположения станции может быть откорректировано по параметрам регулярных ионосферных слоёв E , F_1 , F_2 — критическим частотам и высотам максимумов. Проблема коррекции пространственного распределения электронной концентрации была решена следующим образом. В точке расположения станции вертикального зондирования с широтой φ_0 и долготой λ_0 с периодом 15 мин определялась разница между прогнозируемыми высотами максимумов $\tilde{h}_m$ и критическими частотами $\tilde{f}_0$ регулярных ионосферных слоёв и определёнными по данным зондирования значениями h_m и f_0 . Считалось, что найденные значения разницы $\Delta h_m(\lambda_0, \varphi_0) = h_m(\lambda_0, \varphi_0) - \tilde{h}_m(\lambda_0, \varphi_0)$ и $\Delta f_0(\lambda_0, \varphi_0) = f_0(\lambda_0, \varphi_0) - \tilde{f}_0(\lambda_0, \varphi_0)$ для всех регулярных ионосферных слоёв сохраняются вдоль исследуемой трассы наклонного зондирования. Это предположение для среднеширотных трасс небольшой протяжённости (в нашем случае длина трассы не превышает 1 078 км) в условиях естественно невозмущённой и магнитоспокойной ионосферы можно считать вполне оправданным.

При расчёте профиля $N(h)$ в любой точке на земной поверхности с широтой φ и долготой λ модель IRI-2012 адаптировалась по высотам максимумов и критическим частотам ионосферных слоёв, которые полагались равными $h_m(\lambda_0, \varphi_0) = \Delta h_m(\lambda_0, \varphi_0) + \tilde{h}_m(\lambda_0, \varphi_0)$ и $f_0(\lambda, \varphi) = \Delta f_0(\lambda_0, \varphi_0) + \tilde{f}_0(\lambda, \varphi)$. Для расчёта пространственного распределения электронной концентрации вокруг исследуемой трассы модель IRI-2012 использовалась для вычисления адаптированного профиля $N(h)$ на множестве точек на земной поверхности $\{\lambda_i, \varphi_i\}$ и множестве высот h_j . Расстояние по поверхности Земли между точками, в которых рассчитывался профиль $N(h)$, не превышало 100 км, а шаг по высоте выбирался не более 2 км. Затем таблично заданная функция адаптивного профиля N от широты, долготы и высоты аппроксимировалась трёхмерной плавной функцией, обеспечивающей непрерывность пространственного распределения электронной концентрации вместе с её производными до второго порядка включительно [26, 27].

Координаты источника находились построением лучевой траектории в магнитоактивной трёхмерной ионосфере, адаптированной по данным вертикального зондирования. Для этого по всем

измеренным углам прихода по адаптированной модели вычислялись координаты источника излучения: средняя дальность до источника $\langle S^{(c)} \rangle$, среднеквадратичное отклонение текущей дальности от среднего значения $\sigma_S^{(c)}$ и относительная среднеквадратичная погрешность оценки дальности относительно истинной дальности $\delta S^{(c)}$. Результаты приведены в табл. 1 и 2, а усреднённые по всем этапам и частотам значения — в табл. 3. В среднем коррекция модели IRI-2012 по данным вертикального зондирования в одной точке, расположенной в области приёма, несколько уменьшает погрешности однопозиционной оценки дальности. Например, средняя относительная погрешность уменьшается до 12 % по сравнению со значением 14,6 %, зафиксированным без коррекции модели IRI-2012. Это значение, по нашему мнению, следует считать предельной точностью однопозиционного определения, когда не учитывается влияние перемещающихся ионосферных возмущений.

Данные табл. 3 позволяют сделать следующие выводы. Использование адаптированной по одной станции вертикального зондирования модели IRI-2012 не приводит к существенному увеличению точности однопозиционного определения. Более того, иногда откорректированная по данным вертикального зондирования модель не уменьшает, а увеличивает погрешность нахождения местоположения источника.

3.3. Режим излучения непрерывного ЛЧМ-сигнала

В режиме излучения непрерывного ЛЧМ-сигнала моды распространения разделялись по групповым задержкам. При этом для каждого сеанса наклонного ЛЧМ-зондирования получены многомерные ионограммы, каждая из которых содержала традиционные дистанционно-частотные (ДЧХ) и амплитудно-частотные (АЧХ) характеристики, а также две угловые-частотные характеристики (УЧХ). Угловые частотные характеристики можно измерять только с помощью нового программно-аппаратного комплекса — ЛЧМ-иозонд-радиопеленгатора [4, 23, 24]. Примеры многомерных ионограмм для нескольких сеансов измерений для двух этапов эксперимента показаны на рис. 8 и 9. На каждой многомерной ионограмме даны четыре частотные характеристики разделённых мод распространения: ДЧХ $\tau(f)$, АЧХ $E(f)$, две УЧХ (зависимость угла места каждой моды распространения от частоты $\Delta(f)$) и зависимость азимута прихода каждой моды распространения от частоты $\alpha(f)$. На ДЧХ на некоторых ионограммах нанесены маркеры для мод распространения $1F$ и $2F$.

Для вычисления в процессе зондирования характеристик распространения (групповой задержки, относительной амплитуды, углов прихода радиоволны) на каждой средней частоте обрабатывался ЛЧМ-сигнал с полосой примерно 40 кГц. Соответственно, результаты пеленгования отдельных мод распространения в каждом сеансе зондирования также получены с шагом по частоте 40 кГц. Пеленговались только те парциальные сигналы различных мод распространения, для которых ОСШ в согласованной полосе разностного сигнала превышало 6 дБ.

Помимо автоматической очистки ионограмм от шумов различного происхождения, обработка каждой многомерной ионограммы осуществлялась в полуавтоматическом режиме. В процессе обработки при визуальном контроле в каждом сеансе формировались частотные характеристики отдельных мод распространения для спорадических ($1E_s$, $2E_s$) и регулярных ($1F_2$, $2F_2$) отражений от ионосферы обыкновенных лучей, а в случаях, где их было возможно точно идентифицировать, и для необыкновенных лучей. Далее для каждого сеанса наклонного зондирования на всех частотах идентифицированных мод распространения решалась обратная задача однопозиционного определения. Пространственное распределение электронной концентрации в ионосфере задавалось на основе модели IRI-2012 по описанной выше методике. В итоге для каждого сеанса наклонного зондирования для каждой моды распространения усреднением по частоте вы-

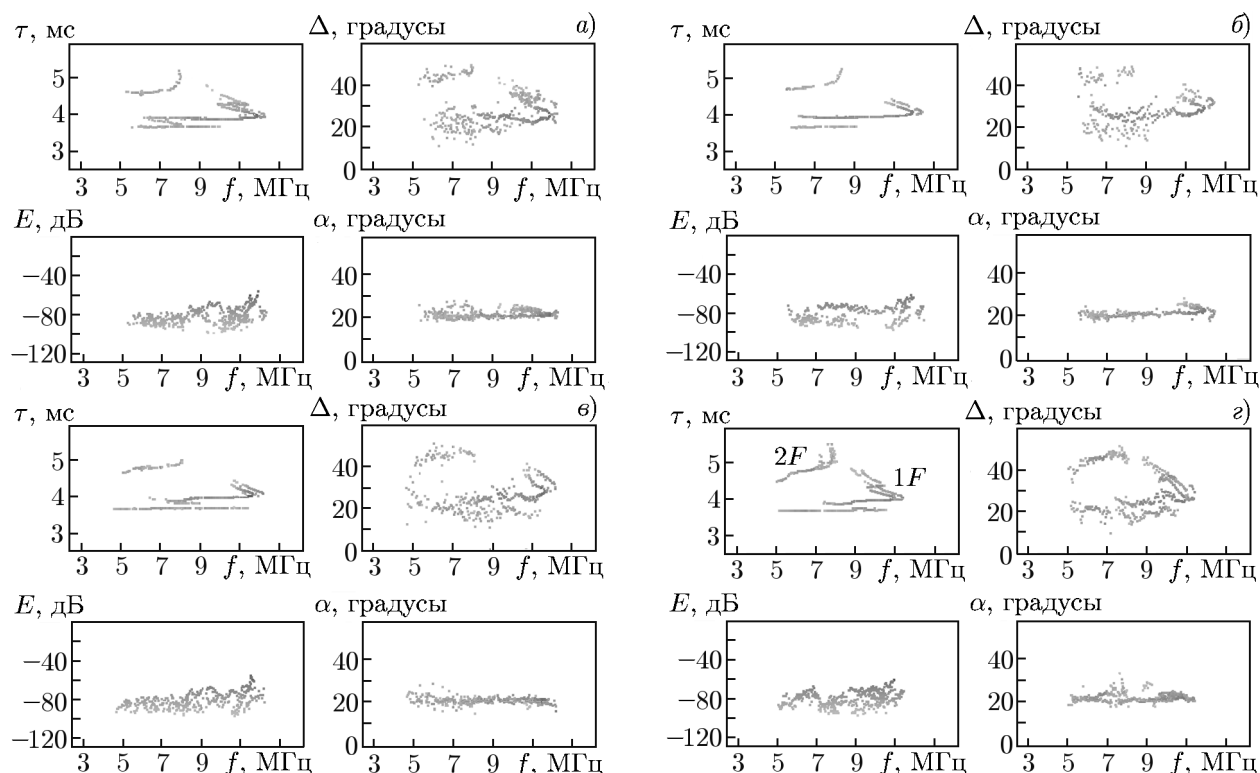


Рис. 8. Результаты измерения частотных характеристик распространения радиоволн на трассе Васильурск—Ростов-на-Дону: 09:46 UT 07.12.2016 (а), 10:26 UT 08.12.2016 (б), 09:54 UT 08.02.2017 (в), 10:20 UT 09.02.2017 (г)

числялись следующие параметры: средний азимут прихода $\langle \alpha \rangle$; среднеквадратичное отклонение азимута прихода волны σ_α от истинного азимута α_0 ; среднее значение оценки однопозиционной дальности до источника $\langle S \rangle$; среднеквадратичное отклонение дальности S от среднего значения $\sigma_S = \sqrt{\langle (S - \langle S \rangle)^2 \rangle}$; относительная среднеквадратичная погрешность $\delta S = \sqrt{\langle (S - S_0)^2 \rangle} / S_0$ оценки дальности до источника относительно истинной дальности S_0 .

В дальнейшем пространственное распределение электронной концентрации в ионосфере корректировалось по данным ростовской станции вертикального зондирования RV149. Была использована методика коррекции, изложенная выше. Для оценки дальности до источника $S^{(c)}$ в адаптированной по результатам станции RV149 модельной ионосфере на всех частотах всех мод распространения решалась обратная задача однопозиционного определения местоположения. Для каждой моды выполнялось усреднение в частотной области результатов оценок дальности $S^{(c)}$. Вычислялись среднее значение дальности до источника $\langle S^{(c)} \rangle$, среднеквадратичное отклонение оценки дальности от среднего значения $\sigma_S^{(c)} = \sqrt{\langle (S^{(c)} - \langle S^{(c)} \rangle)^2 \rangle}$ и относительная среднеквадратичная погрешность оценки дальности до источника $\delta S^{(c)} = \sqrt{\langle (S^{(c)} - S_0)^2 \rangle} / S_0$ относительно истинной дальности S_0 .

Полученные результаты для отдельных сеансов зондирования приведены в табл. 4. В табл. 5 даны итоговые оценки точности однопозиционного определения местоположения с помощью ЛЧМ-передатчика, которые получены для различных мод распространения усреднением по всем сеансам зондирования за два этапа экспериментов.

Как видно из табл. 4 и 5, наименьшая погрешность измерения азимута на источник ЛЧМ-излучения получена при пеленговании сигналов мод распространения $1E_s$ и $2E_s$. Учитывая, что

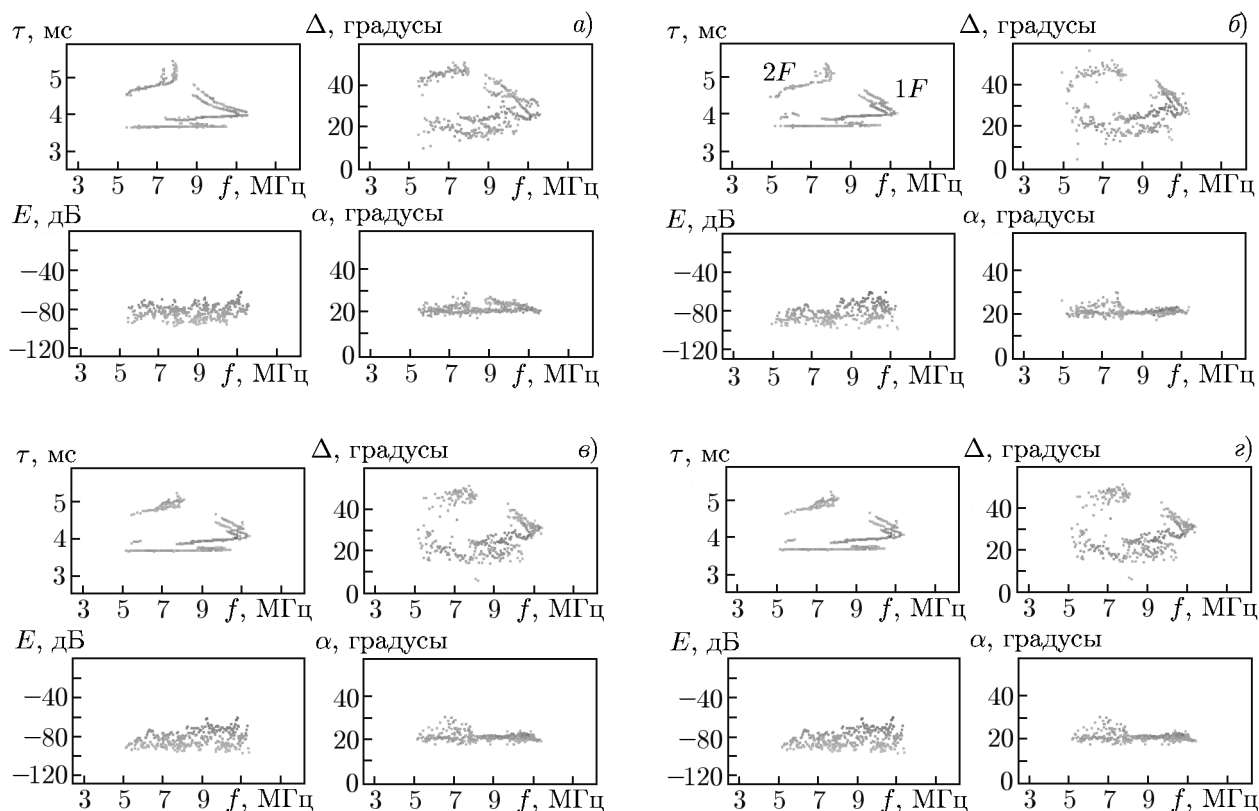


Рис. 9. Влияние перемещающихся ионосферных возмущений на частотные характеристики распространения радиоволн на трассе Васильсурск—Ростов-на-Дону 09:02:2017. Показана динамика характеристик от времени: 10:18 UT (а), 10:22 UT (б), 10:24 UT (в), 10:26 UT (г)

истинное значение азимута на ЛЧМ-передатчик составляет $21,2^\circ$, при пеленговании E_s -мод распространения ошибка не превышает $0,1^\circ$ (см. табл. 5). Конечно, для отдельных сеансов наклонного зондирования, как видно из табл. 4, погрешность оценки азимута ЛЧМ-передатчика может быть существенно выше. Тем не менее, усреднённое по частоте отклонение измеренного по отражениям от слоя E_s азимута от истинного не превышает нескольких десятых долей градуса при среднеквадратичной погрешности около 1° . При пеленговании мод распространения, отражённых от ионосферы слоя F_2 , измеренный азимут на передатчик может заметно отличаться от истинного значения. Эти отклонения изменяются от сеанса к сеансу как по величине, так и по знаку и достигают по модулю значений $0,8^\circ$ для $1F_{2o}$ -моды и несколько больших величин для $1F_{2x}$ -моды. Для мод $2F_{2o}$ и $2F_{2x}$ отклонения измеренного азимута на ЛЧМ-передатчик от истинного может превышать $1,5^\circ$. При этом среднеквадратичное отклонение азимута от истинного минимально для моды $1F_{2o}$, увеличивается для моды $1F_{2x}$, а для мод $2F_{2o}$ и $2F_{2x}$ достигает 3° . Увеличение погрешностей для $1F_{2x}$ -моды обусловлено тем, что по результатам зондирования она чётко отделяется от обыкновенных мод распространения только в области частот, близких к максимальной применимой частоте, где отклонения пеленга для регулярных мод максимальны. Для иллюстрации на рис. 9 приведена последовательность нескольких многомерных ионограмм, полученных 10:18÷10:26 UT 09.02.2017. На них хорошо прослеживается появление на ДЧХ так называемых z -образований, которые, как было показано в предшествующих публикациях, например в работах [4, 23, 24], являются однозначным признаком перемещающихся ионосферных возмущений. Появление z -образований и искажение под влиянием возмущений угловых частот-

Таблица 4. Результаты однопозиционного определения для нескольких сеансов наклонного зондирования

09:46 UT 07.12.2016								
мода	$\langle\alpha\rangle$, градусы	σ_α , градусы	$\langle S\rangle$, км	σ_S , км	δS , %	$\langle S^{(c)}\rangle$, км	$\sigma_S^{(c)}$, км	$\delta S^{(c)}$, %
$1E_s$	21,0	0,10	—	—	—	875,2	38,6	19,2
$2E_s$	21,1	1,10	—	—	—	1 055,5	104,0	9,9
$1F_{2o}$	21,7	1,36	967,1	81,3	12,7	1 025,4	101,3	10,6
$1F_{2x}$	22,4	1,85	900,3	92,2	18,6	1 235,4	5,7	14,5
$2F_{2o}$, $2F_{2x}$	24,1	2,19	928,6	52,2	14,7	963,6	81,6	13,1
10:28 UT 08.12.2016								
мода	$\langle\alpha\rangle$, градусы	σ_α , градусы	$\langle S\rangle$, км	σ_S , км	δS , %	$\langle S^{(c)}\rangle$, км	$\sigma_S^{(c)}$, км	$\delta S^{(c)}$, %
$1E_s$	21,4	1,1	—	—	—	870,8	103,6	21,5
$2E_s$	20,9	0,8	—	—	—	1 035,6	119,6	11,8
$1F_{2o}$	22,8	1,7	919,6	68,5	16,1	982,6	121,4	14,4
$1F_{2x}$	23,8	1,7	939,5	95,7	15,7	—	—	—
$2F_{2o}$, $2F_{2x}$	20,6	2,5	1 034,0	65,5	7,3	1 103,5	7,6	2,4
09:54 UT 08.02.2017								
мода	$\langle\alpha\rangle$, градусы	σ_α , градусы	$\langle S\rangle$, км	σ_S , км	δS , %	$\langle S^{(c)}\rangle$, км	$\sigma_S^{(c)}$, км	$\delta S^{(c)}$, %
$1E_s$	21,7	1,16	—	—	—	1 117,5	147,7	14,2
$2E_s$	21,4	1,30	—	—	—	1 055,4	105,1	10,0
$1F_{2o}$	21,3	1,10	974,2	66,8	11,5	968,8	85,1	12,9
$1F_{2x}$	16,4	2,60	999,7	27,6	7,8	1 182,7	92,4	12,9
$2F_{2o}$, $2F_{2x}$	21,7	2,60	974,3	74,0	11,8	957,4	75,0	13,2
10:20 UT 09.02.2017								
мода	$\langle\alpha\rangle$, градусы	σ_α , градусы	$\langle S\rangle$, км	σ_S , км	δS , %	$\langle S^{(c)}\rangle$, км	$\sigma_S^{(c)}$, км	$\delta S^{(c)}$, %
$1E_s$	21,6	0,3	—	—	—	889,4	107,8	20,2
$2E_s$	21,4	0,7	—	—	—	1 059,3	99,0	9,4
$1F_{2o}$	21,3	1,3	936,3	62,4	14,4	971,4	56,9	11,2
$1F_{2x}$	22,3	1,2	896,6	60,2	17,8	1 037,1	83,5	8,6
$2F_{2o}$, $2F_{2x}$	23,9	3,1	1 000,5	65,7	9,5	1 022,2	72,8	8,5

ных характеристик хорошо видно и на рис. 8а, г. На рис. 8б, в z-образований на ДЧХ нет, однако искажения угловой характеристики $\Delta(f)$ мод, отражённых от слоя F_2 , хорошо видны, особенно на верхних лучах как обыкновенной, так и необыкновенной моды. Причины увеличения отклонений пеленга для кратных регулярных мод распространения также очевидны. Кроме того, в указанные отклонения даёт вклад ещё и наклон земной поверхности в области отражения.

Таблица 5. Усреднённые по всем этапам эксперимента результаты определения дальности до источника ЛЧМ-сигнала

Мода	δS , %	$\delta S^{(c)}$, %	$\langle \alpha \rangle$, градусы
$1E_s$	—	19,5	21,3
$2E_s$	—	9,1	21,1
$1F_{2o}$	13,9	11,7	22,0
$1F_{2x}$	15,5	10,9	22,5
$2F_{2o}, 2F_{2x}$	10,9	9,2	22,8

пространения. Для нижних лучей отклонения пеленга по модулю достигают величин $1^\circ \div 2^\circ$, а для верхних лучей и кратных мод могут возрасти до 8° . Полученные результаты хорошо согласуются с данными ЛЧМ-зондирования на трассе Кипр—Ростов-на-Дону [23].

Таким образом, учитывая влияние перемещающихся ионосферных возмущений на пеленг сигнала, азимут на неизвестный ЛЧМ-передатчик следует оценивать по результатам пеленгования E_s -мод распространения. В противном случае, когда E_s -моды отсутствуют, для оценки азимута на неизвестный ЛЧМ-передатчик следует использовать $1F_{2o}$ -моду. При этом для того, чтобы уменьшить воздействие перемещающихся ионосферных возмущений на результаты оценок, рекомендуется полученные значения азимута усреднить не только по частоте, но и по нескольким сеансам наклонного зондирования.

На рис. 10 показаны результаты имитационного моделирования влияния перемещающихся ионосферных возмущений на частотные характеристики однократных мод распространения радиоволн на трассе Васильсурск—Ростов-на-Дону. Моделирование выполнено для 10:18 UT и 10:22 UT 09.02.2017, что соответствует условиям рис. 9а и б. Перемещающиеся ионосферное возмущение имитировалось гармонической волной, модулирующей среднее распределение электронной концентрации в ионосфере, которое задавалось адаптированной по результатам вертикального зондирования моделью IRI-2012. Параметры возмущения (относительная амплитуда, длина волны, временной период и направление распространения) варьировались в широких пределах так, чтобы добиться качественного подобия измеренных и моделируемых характеристик (ДЧХ и двух УЧХ). Было установлено, что условиям рис. 9 наиболее подходят следующие параметры возмущения: амплитуда $\delta_{TID} \approx 20\%$, длина волны $\Lambda_{TID} \approx 200$ км, направление распространения в горизонтальной плоскости $\alpha_{TID} \approx 200^\circ$, в вертикальной плоскости $\Delta_{TID} \approx -65^\circ$, т. е. возмущение движется вниз вдоль трассы с севера на юг. В результате моделирования установлено, что характерным признаком на УЧХ $\Delta(f)$ движения возмущения с севера на юг является появление в некоторые моменты времени перегиба в окрестности максимальной применимой частоты. При дальнейшем движении возмущения вниз на следах верхних лучей появляется z -образование (см., например, рис. 9б–г и 10б), УЧХ $\Delta(f)$ расширяется, т. е. значительно увеличивается расстояние между углами места нижних и верхних лучей. Малые вариации (около 1°) углов прихода нижних и верхних лучей однократных мод распространения $\alpha(f)$ по частоте и времени подтверждают направление распространения возмущения, близкое к продольному вдоль трассы (см., например, рис. 9б и 10б). Изменение азимута направления возмущения относительно трассы зондирования обуславливает, прежде всего, сильные вариации отклонений пеленга верхних мод распространения как по частоте, так и во времени. Наконец, при росте амплитуды возмущения протяжённость z -образования по частоте значительно увеличивается, а при уменьшении амплитуды — постепенно спадает, след воздействия возмущения на ДЧХ превращается сначала в ступеньку, а в дальнейшем вообще исчезает.

Тем не менее, определяющий, на наш взгляд, вклад в отклонения пеленга мод $1F_{2o}$, $1F_{2x}$ и особенно $2F_{2o}$, $2F_{2x}$ вносят перемещающиеся ионосферные возмущения. По данным работы [28] возмущения с периодами $20 \div 90$ мин существуют в ионосфере практически постоянно.

Как видно из серии приведённых ионограмм, перемещающиеся ионосферные возмущения особенно значительно влияют на отклонения пеленга верхних лучей обеих магнитоионных компонент и отклонения пеленга кратной моды рас-

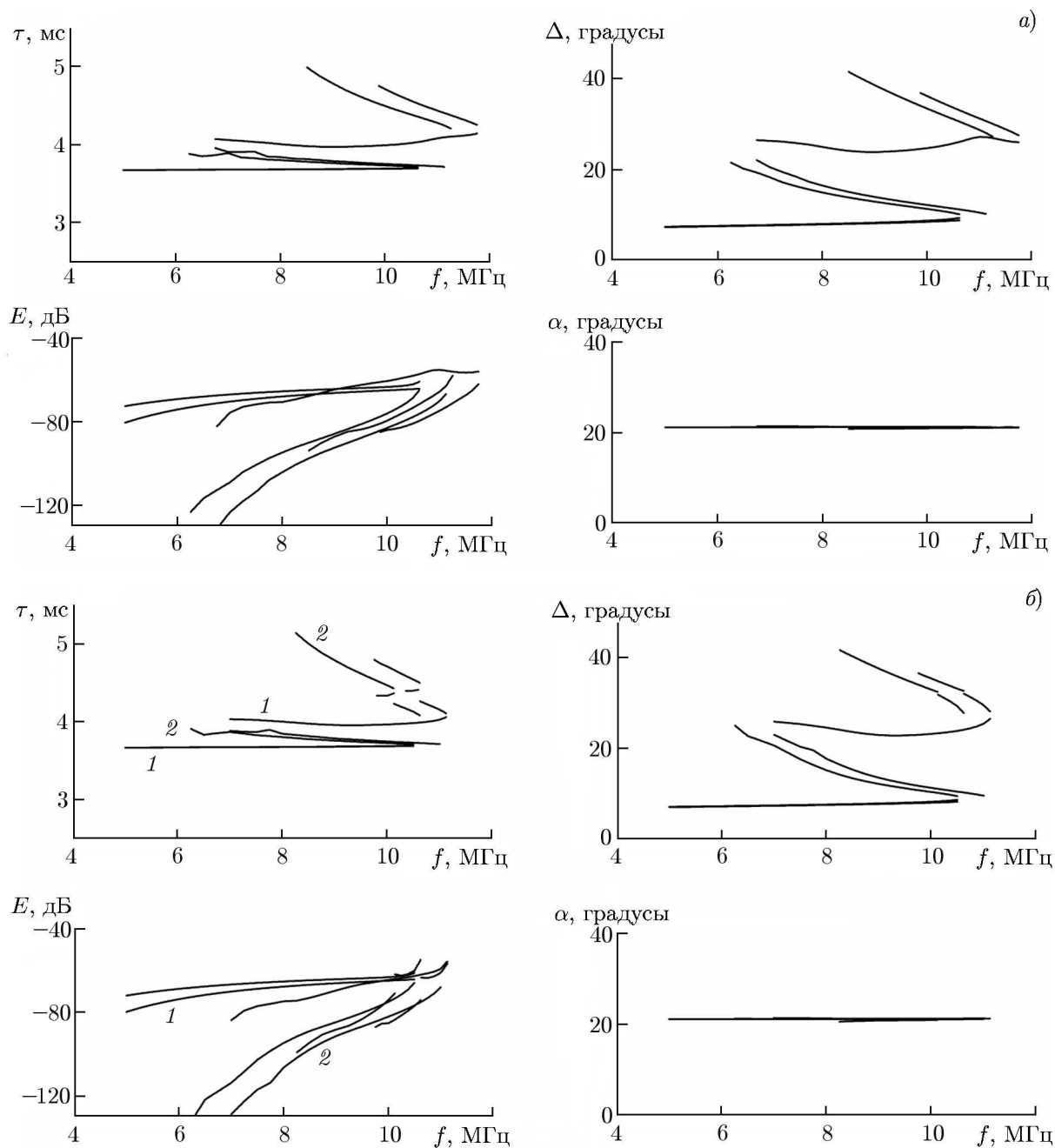


Рис. 10. Результаты моделирования влияния перемещающегося ионосферного возмущения на частотные характеристики коротковолновых сигналов на трассе Васильсурск—Ростов-на-Дону в 10:18 UT (а) и 10:22 UT (б) 09.02.2017; 1 — нижние лучи, 2 — верхние лучи

Погрешности оценки дальности до передатчика однопозиционным методом хорошо согласуются с результатами, полученными на фиксированных частотах. Средние относительные погрешности оценки дальности однопозиционным методом при прогнозировании пространственного распределения электронной концентрации в ионосфере на основе модели IRI-2012 составляют 12÷15 %. При использовании данных текущей диагностики для коррекции пространственного распределения электронной концентрации на основе вертикального зондирования в одной точке,

относительные погрешности оценки дальности до ЛЧМ-передатчика уменьшаются в среднем на $1\div 4\%$. В то же время в отдельных сеансах наклонного зондирования погрешности могут увеличиться. Вариации углов места Δ под влиянием перемещающегося ионосферного возмущения можно увидеть на последовательности ионограмм (см. рис. 9). Здесь изменения углов прихода нижних лучей распространения $1F_2$ -мод достигают 5° в области, где разделяются обыкновенные и необыкновенные моды распространения. Для верхних лучей под влиянием перемещающегося ионосферного возмущения вариации углов места достигают 10° . Кроме того, как видно из ионограмм на рис. 8 и 9, в области низких частот (вдали от максимальной применимой частоты), где магнитоионные компоненты $1F_2$ -мод не разделяются по групповой задержке, наблюдаются значительные вариации угла места за счёт интерференции волн с близкими углами прихода [6, 16, 17]. Как следствие, относительную погрешность оценки дальности до источника однопозиционным методом порядка 12% следует признать предельно достижимым значением даже при коррекции модели ионосферы по данным вертикального зондирования в одной пространственной точке. Эти результаты хорошо согласуются с данными работы [8], полученными методом имитационного моделирования.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе однопозиционной оценки дальности до источника радиоизлучения на среднеширотной трассе Васильсурск—Ростов-на-Дону в условиях разделения различными методами пеленгования одно- и двухскачковых мод распространения показано, что отклонения углов места парциальных мод достигают в азимутальной плоскости 5° , а в угломестной — 10° . Столь существенные изменения углов прихода связаны с наличием в ионосфере перемещающихся ионосферных возмущений. Движение возмущений приводит к квазипериодическим вариациям углов прихода парциальных лучей, формирующих поле коротких волн в зоне приёма.

По результатам дневных измерений в декабре 2016 года и феврале 2017 года на трассе с протяжённостью 1078 км в условиях выделения парциальных мод распространения установлено, что использование модели IRI-2012 для решения обратной задачи и определения по углам прихода координат источника сопровождается относительными погрешностями по дальности, которые достигают 22% . Усреднённая погрешность за все этапы измерений составила около $12\div 14\%$.

Использование свойства адаптивности ионосферной модели IRI-2012 позволяет по данным вертикального зондирования корректировать пространственное распределение электронной концентрации по высотам максимумов и критическим частотам регулярных ионосферных слоёв E , F_1 и F_2 . Анализ показал, что использование адаптированной по одной станции вертикального зондирования модели ионосферы IRI-2012 не позволяет существенно увеличить точность однопозиционного определения. Даже в случае адаптации ионосферной модели средняя погрешность оценки дальности до источника не становится существенно меньше 12% .

При наличии спорадического слоя E_s для оценки азимута на неизвестный ЛЧМ-передатчик следует использовать результаты пеленгования E_s -мод распространения. При усреднении пеленгов по частоте и по сеансам наклонного ЛЧМ-зондирования азимут на передатчик может быть оценен с точностью около $0,1^\circ$. При использовании для оценки азимута на ЛЧМ-передатчик регулярных мод $1F$ и $2F$ необходимо усреднение результатов по частоте и сеансам наклонного зондирования. При этом для $1F$ -мод погрешность оценки азимута на передатчик в среднем составляет $0,5^\circ$, а при использовании $2F$ -мод — около $1^\circ\div 2^\circ$.

Следует считать, что средняя относительная погрешность определения дальности до источника как с использованием прогностической модели ионосферы IRI-2012, так и в условиях её коррекции по данным станции вертикального зондирования составляет 13% .

Для внедрения в практику ионосферных исследований разработанных алгоритмов позиционирования источников радиоизлучения необходимо проведение дальнейших исследований на трассах с различной протяжённостью и ориентацией в различных гелиогеофизических условиях.

Работа В. П. Урядова, Ф. И. Выборнова и А. В. Першина выполнена при финансовой поддержке базовой части Госзадания Минобрнауки РФ (шифр 3.7939.2017/8.9).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Попов И. В., Луценко В. И., Луценко И. В. Современные проблемы радиоэлектроники. М: Радио и связь, 2006. С. 25.
2. Ткачёв Г. Н., Готовчиц И. В., Крылов Б. Н. // Труды IV Всеросс. конф. «Радиолокация и радиосвязь». Москва, 29 ноября–3 декабря 2010 года ИРЭ РАН. С. 264.
3. Вертоградов Г. Г., Урядов В. П., Вертоградова Е. Г., Понятов А. А. // Изв. вузов. Радиофизика. 2010. Т. 53, № 3. С. 176.
4. Вертоградов Г. Г., Урядов В. П., Вертоградов В. Г. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2013. Т. 56, № 5. С. 287.
5. Урядов В. П., Вертоградов Г. Г., Складчиков М. С., Выборнов Ф. И. // Изв. вузов. Радиофизика. 2017. Т. 60, № 9. С. 770.
6. Барабашов Б. Г., Вертоградов Г. Г., Хонду А. А. // Радиотехника. 1987. № 9. С. 3.
7. Пат. 2285934 РФ, МПК G01S 5/04. Способ однопозиционного определения местоположения ДКМВ передатчиков / Вертоградов Г. Г., Вертоградов В. Г., Кондаков Е. В., Шевченко В. Н. Заявл. 15.06.2004. Оpubл. 20.10.2006. Бюл. № 29. 9 с.
8. Вертоградов Г. Г., Кондаков Е. В. // Геомагн. и аэрономия. 2003. Т. 43, № 6. С. 799.
9. Денисенко П. Ф., Вертоградов Г. Г., Шевченко В. Н., Кузнецов Е. В. // Электромагнитные волны и электронные системы. 2006. Т. 11, № 5. С. 24.
10. Барабашов Б. Г., Мальцева О. А. // Труды НИИР. 2003. С. 120.
11. Bilitza D., Altadill D., Zhang Y., et al. // J. Space Weather Space Clim. 2014. V. 4, No. A07.
12. Вертоградов Г. Г., Чайка Е. Г. // Радиотехника. 2016. № 11. С. 217.
13. Lay K. // Int. Conf. Radar. Adelaide, Australia, 2–5 Sept. 2008. P. 309.
14. Lay K. // Institution Engineering and Technology 11th Int. Conf. Ionospheric Radio Systems and Techniques, 28–30 April 2009. P. 1.
15. Erhel Y., Marie F. // Military Communications Conf. Orlando, USA, 29–31 Oct. 2007. P. 1.
16. Gething P. J. D. Radio direction-finding and resolution of multicomponent wave-fields. London: Peter Peregrinus Ltd, 1976. 329 p.
17. Gething P. J. D. Radio direction finding and superresolution. London: Peter Peregrinus Ltd, 1990. 365 p.
18. Ратынский М. В. Адаптация и сверхразрешение в антенных решетках. М.: Радио и связь, 2003. 200 с.
19. Грешников А. А. Некорректные задачи цифровой обработки информации и сигналов. М: Университетская книга; Логос, 2009. 360 с.
20. Марпл.-мл. С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. М.: Мир, 1990. 584 с.
21. Вертоградов Г. Г., Мятешников Ю. П. // Геомагн. и аэрономия. 2004. Т. 44, № 3. С. 357.
22. Пат. 2190236 РФ, МПК 7G01S 5/04. Способ обнаружения и определения двухмерного пеленга и частоты источников радиоизлучения / Шевченко В. Н., Емельянов Г. С., Вертоградов Г. Г. Заявл. 13.09.2000. Оpubл. 27.09.2002. Бюл. № 27. 8 с.

23. Вертоградов Г. Г., Урядов В. П., Складневский М. С., Валов В. А. // Изв. Вузов. Радиофизика. 2016. Т. 59, № 11. С. 991.
24. Валов В. А., Вертоградов Г. Г., Вертоградов В. Г. и др. // Физические основы приборостроения. 2012. Т. 1, № 4. С. 24.
25. <http://space-weather.ru>
26. Барабашов Б. Г., Вертоградов Г. Г. // Математическое моделирование. 1996. Т. 8, № 2. С. 3.
27. Вертоградов Г. Г. // Радиотехника и электроника. 2003. Т. 48, № 11. С. 1322.
28. Вертоградов Г. Г., Вертоградов В. Г., Урядов В. П. // Изв. вузов. Радиофизика. 2006. Т. 49, № 12. С. 1015.

Поступила в редакцию 4 сентября 2017 г.; принята в печать 25 декабря 2017 г.

SINGLE-STATION DETERMINATION OF THE LOCATION OF RADIO EMISSION SOURCES IN THE DECAMETER WAVE RANGE USING A WIDE-APERTURE DIRECTION FINDER AND A CHIRP IONOSONDE–RADIO DIRECTION FINDER

*G. G. Vertogradov, V. P. Uryadov, E. G. Chaika, V. A. Valov, F. I. Vybornov, A. V. Pershin, and
A. S. Starodubrovsky*

We present the results of single-station determination of the location of radio emission sources on the Vasilsursk—Rostov-on-Don mid-latitude path using a wide-range direction finder and a chirp ionosonde–radio direction finder. Methods for determining the arrival angles under conditions of multipath reception of radio signals are described. It is shown that when single- and double-hop propagation modes are separated by different direction-finding techniques, deviations of the arrival angles reach 5° in the azimuthal plane and up to 10° in the elevation plane, which is due to the traveling ionospheric disturbances. It is established that under conditions of a sporadic E_s layer, the chirp-transmitter azimuth with averaging over frequency and sounding sessions can be determined to an accuracy of 0.1° . When regular $1F$ and $2F$ propagation modes are used to estimate the chirp-transmitter azimuth, the average error is 0.5° and 1° – 2° , respectively. An algorithm for solving the inverse problem, by which the coordinates of the radio-emission sources can be determined from the arrival angles using both the IRI-2012 ionospheric prediction model and correction of the data from the vertical sounding station at the reception point, have been developed. It is shown that the average error in determining the range to radio-emission sources is 13%.