

УДК 550.388.2

СВЕРХДАЛЬНОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ИОНОСФЕРНОГО КАНАЛА С ПОМОЩЬЮ ИОНОЗОНДА/ПЕЛЕНГАТОРА С ЛИНЕЙНОЙ ЧАСТОТНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ СИГНАЛА

Г. Г. Вертоградов¹, В. П. Урядов², Е. Г. Вертоградова¹, А. А. Понятов²

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

² Научно-исследовательский радиофизический институт, г. Нижний Новгород, Россия

Представлены результаты экспериментальных исследований распространения коротких радиоволн на протяжённой трансэкваториальной трассе Лейвертон (Австралия)—Ростов-на-Дону, полученные с помощью ионозонда/пеленгатора с линейной частотной модуляцией сигнала. Показано, что на данной трассе реализуются условия для распространения аномальных сигналов посредством бокового отражения радиоволн от горного массива Гималаи и Иранского нагорья, а также за счёт рассеяния рикшетирующих мод от высокоширотной ионосферы северного полушария. Проведено моделирование распространения радиоволн с учётом рассеяния на анизотропных магнитно-ориентированных неоднородностях высокоширотной ионосферы, расположенных на северной стенке главного ионосферного провала F -слоя. Показано, что результаты эксперимента хорошо согласуются с расчётными данными.

ВВЕДЕНИЕ

Интерес к сверхдальному распространению коротких радиоволн определяется рядом факторов, среди которых можно выделить следующие. Во-первых, это возможность оперативной диагностики ионосферы Земли в планетарном масштабе. Во-вторых, сверхдальное зондирование даёт возможность изучать особенности различных механизмов распространения, включая волноводное распространение, роль которого возрастает с увеличением протяжённости трассы. В-третьих, на трассах большой протяжённости, пересекающих различные ионосферные зоны и области с различным рельефом земной поверхности, можно исследовать влияние неоднородных структур различных масштабов на характеристики коротковолновых сигналов и решать обратную задачу зондирования. Большинство данных по сверхдальному, в частности кругосветному, распространению коротких радиоволн получено с использованием зондирования на фиксированных частотах [1]. Вследствие нестационарности ионосферного канала это существенно ограничивает возможности исследования особенностей сверхдального распространения радиоволн в различных геофизических и ионосферных условиях.

Значительный импульс исследования сверхдального распространения радиоволн получили благодаря использованию современной техники широкополосного зондирования ионосферы сигналами с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ), обладающими высокой помехозащищённостью. С помощью ЛЧМ-ионозондов получены новые данные об особенностях волноводного распространения радиоволн и влиянии экваториальной аномалии на характеристики радиосигналов на кругосветных трассах [2, 3], показана возможность управления волноводным распространением за счёт модификации ионосферы мощным радиоизлучением [2]. Вместе с тем многообразие ионосферных условий, влияние ионосферных возмущений естественного и искусственного происхождения на характеристики сигналов в ряде случаев затрудняют интерпретацию экспериментальных данных сверхдального распространения радиоволн. В связи с этим использование для сверхдального зондирования ЛЧМ-ионозонда/пеленгатора [4], способного наряду с

дистанционно-частотными и амплитудно-частотными характеристиками измерять угловые частотные характеристики сигналов, существенно расширяет возможности исследования особенностей сверхдальнего распространения радиоволн.

В работе представлены результаты экспериментальных исследований и дана интерпретация аномальных сигналов, зарегистрированных с помощью ЛЧМ-ионозонда/пеленгатора на протяжённой трансэкваториальной трассе.

1. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперимент по сверхдальному зондированию ионосферного канала проводился с декабря 2009 года по январь 2010 года. В качестве передатчика ЛЧМ-сигналов использовалась станция, расположенная в Лейвертоне (28,628° ю. ш., 122,403° в. д.), Австралия. Режим работы станции: диапазон частот 5÷30 МГц, скорость перестройки частоты 125 кГц/с, повторяемость излучения через 4 минуты. Приём ЛЧМ-сигналов осуществлялся в Ростове-на-Дону с помощью ЛЧМ-ионозонда/пеленгатора, который позволяет измерять полный набор характеристик ионосферного радиоканала (дистанционно-частотные, амплитудно-частотные и угловые частотные характеристики) [4]. Протяжённость трансэкваториальной трассы Лейвертон—Ростов-на-Дону составляет 11 790 км, азимут из приёмного пункта на передающий пункт составляет 115°.

В состав ЛЧМ-ионозонда/пеленгатора входят два радиоприёмника с общим гетеродином, в качестве которого используется перестраиваемый ЛЧМ-генератор. В качестве антенн применяется N -элементная антенная решётка, состоящая из N вертикальных штыревых антенн, которая используется для определения амплитудно-фазового распределения поля радиоволн на апертуре антенной решётки и оценки углов прихода различных лучей путём фурье-синтеза диаграммы направленности. Одна из антенн решётки (опорная антенна) через разветвитель постоянно подключена на вход 1-го радиоприёмника (опорный канал), со второго выхода разветвителя сигнал с опорной антенны подаётся на один из входов антенного коммутатора, к остальным входам коммутатора подключены оставшиеся элементы ($N - 1$) антенной решётки. С выхода антенного коммутатора сигнал подаётся на вход второго радиоприёмника (предметный канал). В данном эксперименте антенная решётка состояла из 16 вертикальных штыревых антенн с высотой 9 м, размещённых на площадке 80×80 м.

Разветвитель сигнала опорной антенны предназначен для калибровки фазовой неидентичности каналов двух когерентных радиоприёмников.

Антенный коммутатор управляется с помощью пользовательского интерфейса многопоточного вычислителя и предназначен для периодического подключения каждого из антенных элементов N -элементной антенной решётки к входу предметного канала.

При переключении с помощью антенного коммутатора предметный канал периодически подключается к опорной антенне. Как следствие, в этот момент времени каналы двух приёмников подключаются к опорной антенне. По выборке сигнала с опорной антенны определяется комплексный коэффициент разноканальности (разность фаз и отношение амплитуд), описывающий отношение комплексных коэффициентов передачи предметного и опорного каналов. В дальнейшем этот коэффициент используется для коррекции комплексных относительных амплитуд сигналов, полученных по выборкам с других $N - 1$ антенных элементов. В результате обеспечивается измерение относительных (по отношению к опорной антенне) комплексных амплитуд сигналов со всех антенных элементов, инвариантных относительно комплексных коэффициентов передачи каналов двух радиоприёмников.

С выхода промежуточной частоты двух приёмников сигнал поступает на двухканальный аналого-цифровой преобразователь, который предназначен для синхронной оцифровки сигналов

с двух приёмников.

Обработка оцифрованного разностного сигнала осуществляется с помощью многопоточного вычислителя, где оценивается спектральная плотность мощности сигнала и шума многооконным методом, обнаружение лучей, определение их числа n , комплексных амплитуд a_j , задержек τ_j , коэффициента мутности β^2 (отношение мощностей регулярной и флуктуационной составляющих сигнала). Здесь же осуществляется «очистка» ионограмм, выделение частотных ветвей и формирование зависимостей $a_j(f)$, $\tau_j(f)$, $\beta_j^2(f)$, частотной зависимости отношения уровней сигнала и шума ОСШ (f), определение наименьшей и максимальной наблюдаемых частот, интервалов многолучёвости, интервала временного рассеяния $\Delta\tau$, среднеквадратичного отклонения ОСШ, вероятности ошибки, надёжности связи [5].

С помощью многопоточного вычислителя осуществляется измерение двухмерных угловых координат каждого j -го луча путём фурье-синтеза диаграммы направленности антенны и окончательная очистка ионограмм на основе критерия достоверности оценки углов прихода. После обработки сигналы поступают на вход блока формирования и отображения выходной информации, где осуществляется формирование и отображение дистанционно-частотных, амплитудно-частотных и двухмерных угловых частотных характеристик, а также максимальной и наименьшей наблюдаемых частот, уровня спектральной плотности шума, коэффициента мутности, вероятности ошибки, надёжности связи.

Следует отметить, что при измерении угловых частотных характеристик достигается дополнительная очистка результатов зондирования от шумов естественного происхождения и станционных помех.

Временная синхронизация работы комплекса осуществляется по сигналам GPS-приёмника. Более полное описание работы ЛЧМ-ионозонда/целенгатора приведено в [6].

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА И МОДЕЛИРОВАНИЯ

Наблюдения проводились с 05.12.2009 по 12.01.2010. Хотя ЛЧМ-передатчик в Австралии работает нерегулярно, тем не менее, получены данные для различного времени суток (всего зарегистрировано 729 ионограмм), которые отражают особенности распространения радиоволн на протяжённой трансэкваториальной трассе. Отметим, что во время эксперимента была спокойная геомагнитная обстановка, трёхчасовой магнитный индекс $K_p \sim 1 \div 2$. Нас в первую очередь интересуют случаи, когда наряду с прямым сигналом, распространяющимся по дуге большого круга между передатчиком и приёмником, регистрировались аномальные сигналы с большей задержкой, чем задержка прямого сигнала. Характерные примеры дистанционно-частотных, амплитудно-частотных и угловых частотных характеристик с аномальными сигналами показаны на рис. 1–3. Как видно из рис. 1 и 2, в дневные часы наряду с прямым сигналом с азимутом угла прихода $\alpha \approx 115^\circ$ регистрировались аномальные сигналы с небольшой задержкой: в 09:23 MSK на частотах $16 \div 20,5$ МГц с азимутом угла прихода $\alpha \approx 100^\circ$ и задержкой примерно $1 \div 2$ мс относительно прямого сигнала (см. рис. 1), амплитуда сигнала была на $15 \div 20$ дБ меньше амплитуды прямого сигнала; в 11:35 MSK на частотах $20 \div 25$ МГц с азимутом угла прихода $\alpha \approx 145^\circ \div 150^\circ$ и задержкой $2 \div 3$ мс (см. рис. 2), амплитуда сигнала была на $20 \div 25$ дБ меньше амплитуды прямого сигнала. В вечернее время часто регистрировался интенсивный аномальный сигнал на частотах $5 \div 7$ МГц с азимутом угла прихода $\alpha \approx 20^\circ$ и задержкой $11 \div 12$ мс относительно прямого сигнала. Типичный пример дистанционно-частотных, амплитудно-частотных и угловых частотных характеристик с наличием такого аномального сигнала для 21:27 MSK показан на рис. 3. Вертикальные полосы на ионограммах с отсутствием сигнала в окрестности частот 6 и 7,3 МГц обусловлены воздействием сильных станционных помех. В дальнейшем основное внимание мы уделим ана-

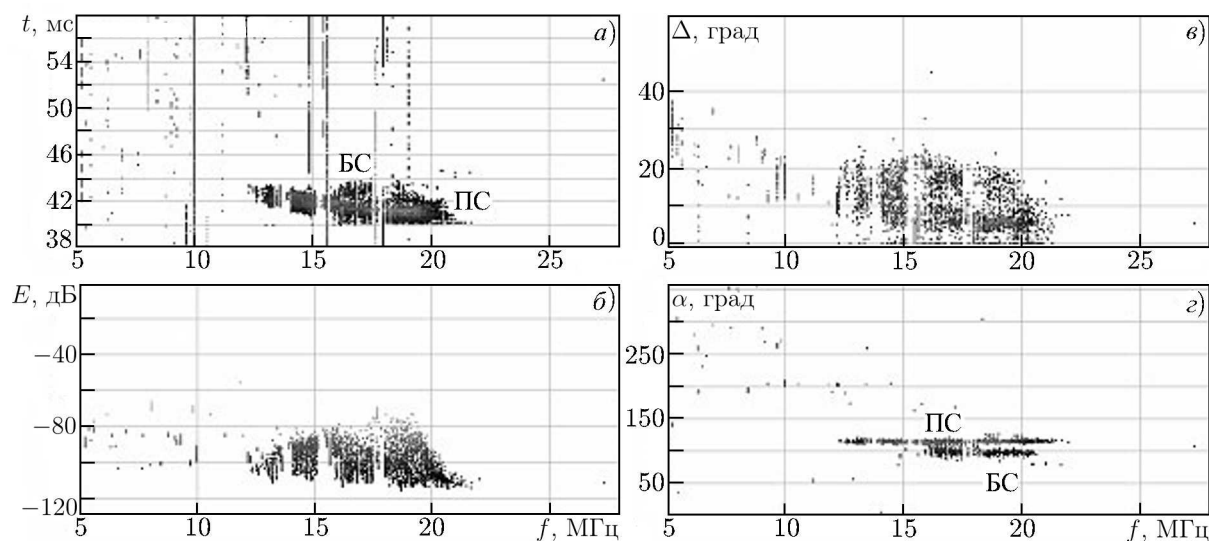


Рис. 1. Дистанционно-частотная (*а*; здесь и далее дистанция в километрах составляет $t[\text{мс}] \times 300$), амплитудно-частотная (*б*) и угловые частотные ((*в*) — угол места Δ , (*г*) — азимут α) характеристики на трассе зондирования Лейвертон—Ростов-на-Дону. 09:23 MSK 12.01.2010, ПС — прямой сигнал, БС — боковой сигнал

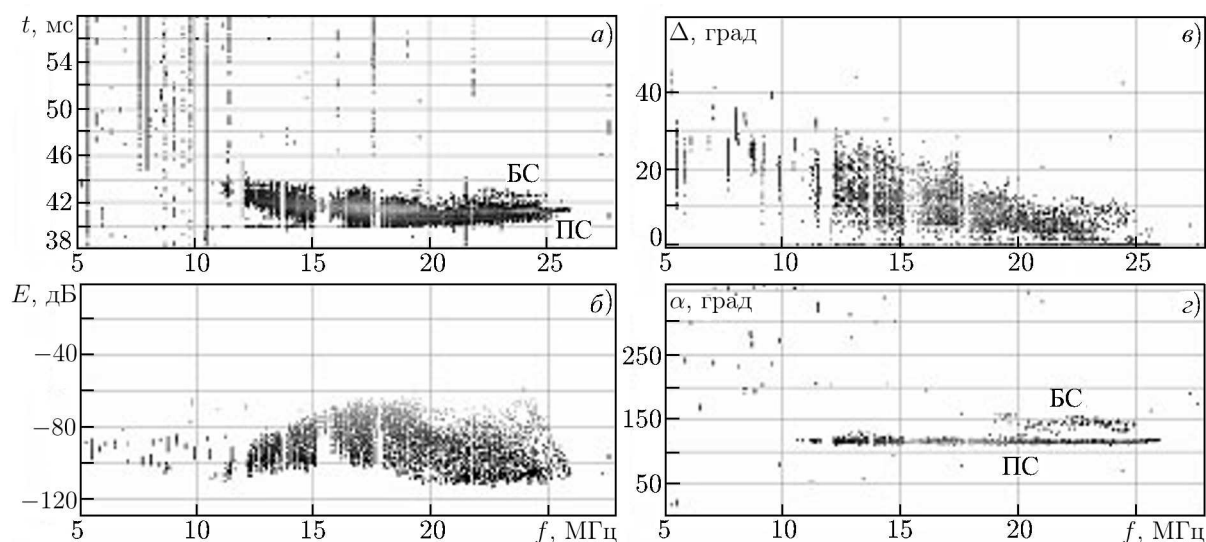


Рис. 2. Дистанционно-частотная (*а*), амплитудно-частотная (*б*) и угловые частотные ((*в*) — угол места Δ , (*г*) — азимут α) характеристики на трассе зондирования Лейвертон—Ростов-на-Дону. 11:35 MSK 12.01.2010, ПС — прямой сигнал, БС — боковой сигнал

лизу аномальных (боковых) сигналов с большой задержкой, амплитуда которых сопоставима с амплитудой прямого сигнала. На рис. 4 приведена гистограмма появления аномального сигнала с большой задержкой. Из рис. 4 видно, что этот сигнал наблюдался в основном в вечернее время с наибольшей вероятностью появления в 20:00÷24:00 MSK. Для более наглядного представления характеристик прямого и аномального сигналов для сеанса в 21:27 MSK на рис. 5 и 6 показаны дистанционно-частотные, амплитудно-частотные и угловые частотные характеристики отдельно для прямого (рис. 5) и аномального (рис. 6) сигналов. Как видно из рис. 5 и 6, амплитуда аномального сигнала сопоставима с амплитудой прямого сигнала, их отличие составляет 5÷10 дБ.

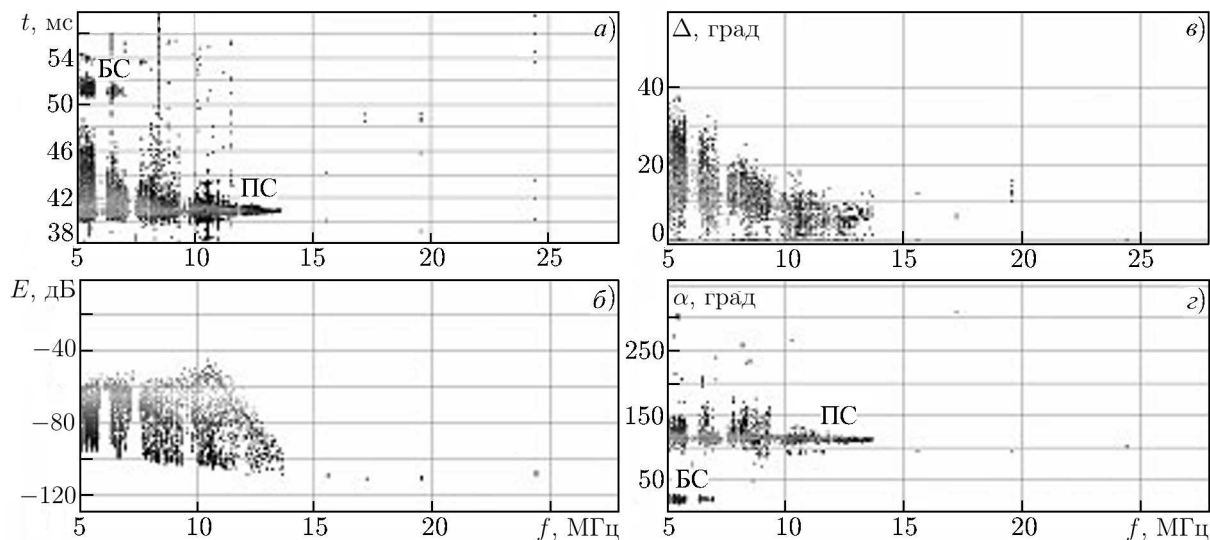


Рис. 3. Дистанционно-частотная (а), амплитудно-частотная (б) и угловые частотные ((в) — угол места Δ , (г) — азимут α) характеристики на трассе зондирования Лейвертон—Ростов-на-Дону. 21:27 MSK 11.01.2010, ПС — прямой сигнал, БС — боковой сигнал

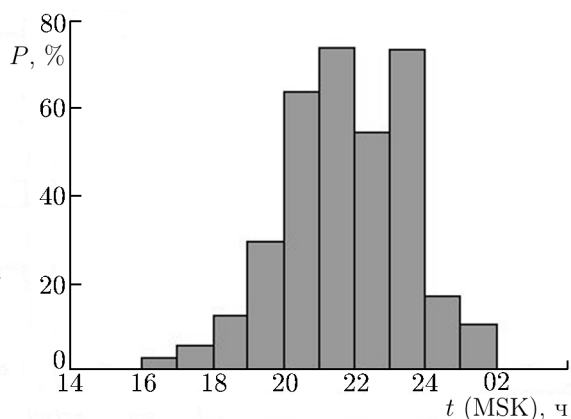


Рис. 4. Гистограмма появления anomальных сигналов с задержкой 11÷12 мс относительно прямого сигнала на трассе Лейвертон—Ростов-на-Дону с азимутальными углами прихода $18^\circ \div 21^\circ$ за период наблюдений 05.12.2009–12.01.2010

Углы прихода в вертикальной плоскости на частотах $5 \div 7$ МГц составляли в среднем $10^\circ \div 30^\circ$ и $20^\circ \div 35^\circ$ для прямого и anomального сигналов соответственно.

Исходя из геометрии трансэкваториальной трассы и результатов измерений дистанционно-частотных, амплитудно-частотных и угловых частотных характеристик прямых и anomальных (боковых) сигналов, мы полагаем, что диффузные anomальные сигналы с задержкой $2 \div 3$ мс, наблюдавшиеся в дневные часы, связаны с отражением радиоволн от горного массива Гималаи для сеанса 09:23 MSK и от Иранского нагорья для сеанса 11:35 MSK. Что касается anomального сигнала с большой задержкой $11 \div 12$ мс и азимутом угла прихода $\alpha \approx 20^\circ$, то мы считаем, что этот сигнал обусловлен рассеянием радиоволн от неоднородностей высокоширотной ионосферы.

Для подтверждения сделанных предположений о природе anomальных сигналов мы провели моделирование распространения радиоволн. Расположение областей рассеяния радиоволн на Земле и в ионосфере, ответственных за появление anomальных (боковых) сигналов, мы выбирали на основе результатов измерений задержки времени прихода и азимутальных углов прихода anomальных сигналов с учётом моделирования распространения радиоволн. Согласно измерениям и расчётам, за боковой сигнал с большой задержкой ответственна область высокоширотной ионосферы с географическими координатами подыоносферной точки центра этой области 71° с. ш., $68,5^\circ$ в. д. (геомагнитные координаты $66,25^\circ$ с. ш., $144,67^\circ$ в. д.). Для условий спокойной ионосферы эта область совпадает с положением северной стенки главного ионосферного провала ионизации [7], характеризуемого наличием в вечерние и ночные часы местного време-

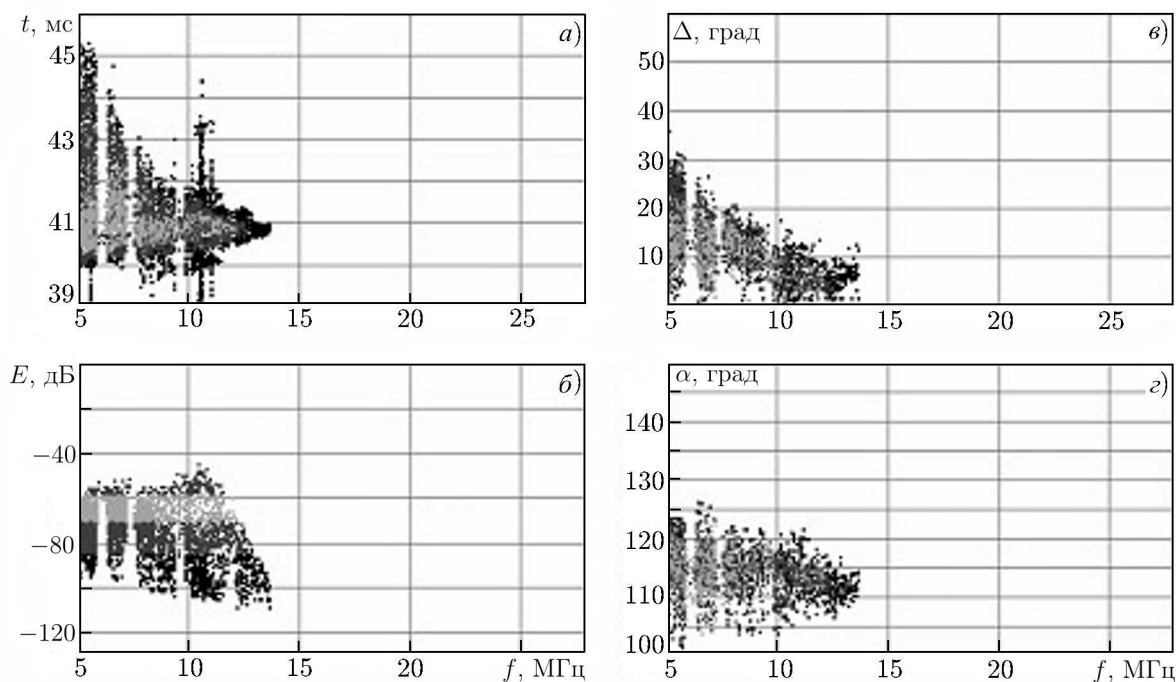


Рис. 5. Дистанционно-частотная (а), амплитудно-частотная (б) и угловые частотные ((в) — угол места Δ , (г) — азимут α) характеристики прямого сигнала на трассе зондирования Лейвертон—Ростов-на-Дону для сеанса 21:27 MSK 11.01.2010

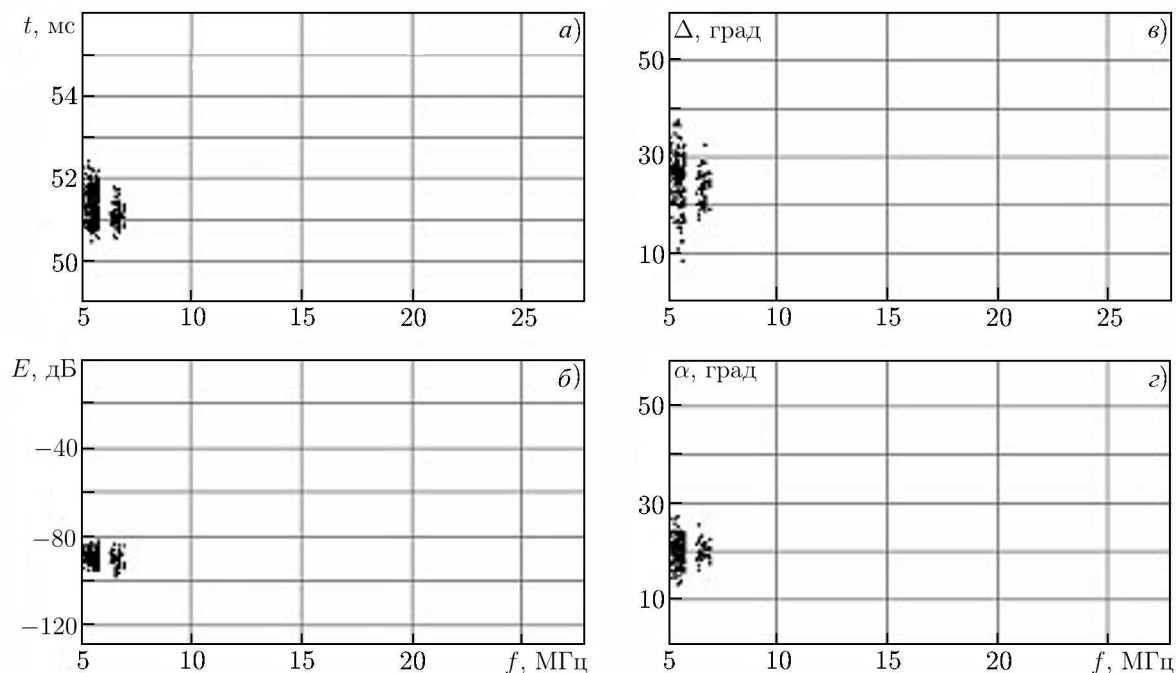


Рис. 6. Дистанционно-частотная (а), амплитудно-частотная (б) и угловые частотные ((в) — угол места Δ , (г) — азимут α) характеристики аномального (бокового) сигнала с задержкой 51÷52 мс (11÷12 мс относительно прямого сигнала) на трассе зондирования Лейвертон—Ростов-на-Дону для сеанса 21:27 MSK 11.01.2010

ни интенсивных мелкомасштабных неоднородностей электронной концентрации, ответственных за обратное рассеяние коротковолновых сигналов [8]. Формирование неоднородностей в области северной стенки главного ионосферного провала связано с высыванием электронов и градиентно-дрейфовой неустойчивостью [9]. Отметим, что иногда на ионограммах одновременно регистрировались два аномальных (боковых) сигнала с большой задержкой: один сигнал принимался с азимута примерно 20° и имел задержку порядка $11 \div 12$ мс, второй — с азимута примерно 10° и имел задержку порядка $14 \div 15$ мс. В этом случае второму сигналу соответствует область рассеяния с координатами центра подыоносферной точки 76° с. ш., 61° в. д. (геомагнитные координаты 71° с. ш., $141,5^\circ$ в. д.). При этом расстояние между центрами двух областей рассеяния составляет примерно 600 км. Полученные данные указывают на наличие пэтчевой структуры областей с мелкомасштабными неоднородностями на северной стенке ионосферного провала, что согласуется с представлением [9] об образовании пэтчей вблизи экваториальной границы аврорального овала, пространственно коррелированной с полярной стенкой ионосферного провала, в результате конвекционных процессов в ионосферной плазме. В нашем эксперименте в условиях спокойной геомагнитной обстановки в пользу конвекционных процессов образования пэтчей свидетельствует то обстоятельство, что такие процессы имеют место независимо от геомагнитной активности. Заметим, что аналогичный эффект регистрации двух аномальных сигналов, обусловленных рассеянием от неоднородностей субавроральной ионосферы, наблюдался в ночные часы на трансэкваториальной трассе ЛЧМ-зондирования Алис Спрингс (Австралия)—Нижний Новгород в эксперименте, проводившемся в августе 1998 года [10].

Что касается аномальных диффузных сигналов с небольшой задержкой $2 \div 3$ мс, то согласно измерениям и расчётам эти сигналы обусловлены отражением радиоволн от горного массива Гималаи с азимутом угла прихода $\alpha \approx 100^\circ$ и от Иранского нагорья с азимутом угла прихода $\alpha \approx 145^\circ \div 150^\circ$. Геометрия трассы и возможные пути распространения радиосигналов показаны на рис. 7.

Как уже говорилось, в данной работе основное внимание мы уделили моделированию аномального сигнала с большой задержкой (порядка $11 \div 12$ мс) и азимутом угла прихода $\alpha \approx 20^\circ$. Проводился расчёт траекторий для частот от 5 до 15 МГц для углов излучения от 0° до угла выхода луча из ионосферы для прямого сигнала на трассе Лейвертон—Ростов-на-Дону и для бокового сигнала на трассах Лейвертон—область рассеяния и область рассеяния—Ростов-на-Дону с учётом ракурсного рассеяния радиоволн. В расчётах область рассеяния с мелкомасштабными неоднородностями взята в виде диска с радиусом 100 км на высотах F -области ($200 \div 300$ км) с координатами подыоносферной точки центра диска 71° с. ш., $68,5^\circ$ в. д. Горизонтальный размер диска (примерно 200 км) выбран для согласования с наблюдаемой диффузностью аномального сигнала (порядка 1 мс). Расчёт траекторий проводился по модели ионосферы IRI-2001 с коррекцией ионосферных данных по ионограммам наклонного ЛЧМ-зондирования на прямой трассе Лейвертон—Ростов-на-Дону. Результаты расчёта лучевых траекторий на трассе Лейвертон—область рассеяния показаны на рис. 8а, б. Здесь же показан ход критической частоты f_{oF_2} и высоты максимума $h_{\max}$ слоя F_2 вдоль трассы распространения. Область рассеяния выделена чёрным цветом. Согласно расчётам, на частотах $5 \div 7$ МГц за счёт отрицательного градиента электронной концентрации и увеличения высоты максимума F -слоя вдоль трассы распространения имеет место рефракционный захват радиоволн на рикошетирующие траектории либо на первом, либо на втором скачке. На частотах $10 \div 12$ МГц имеет место захват радиоволн на волноводные траектории типа «шепчущей галереи» с минимальной высотой прохождения лучевой траектории над поверхностью Земли $h \geq 100$ км (см. рис. 8б). Следует отметить, что на многоскачковых трассах распространение радиоволн рикошетирующими (волноводными) траекториями имеет преимущество по энергетике по сравнению со скачковыми траекториями, поскольку в первом случае отсутствуют потери при

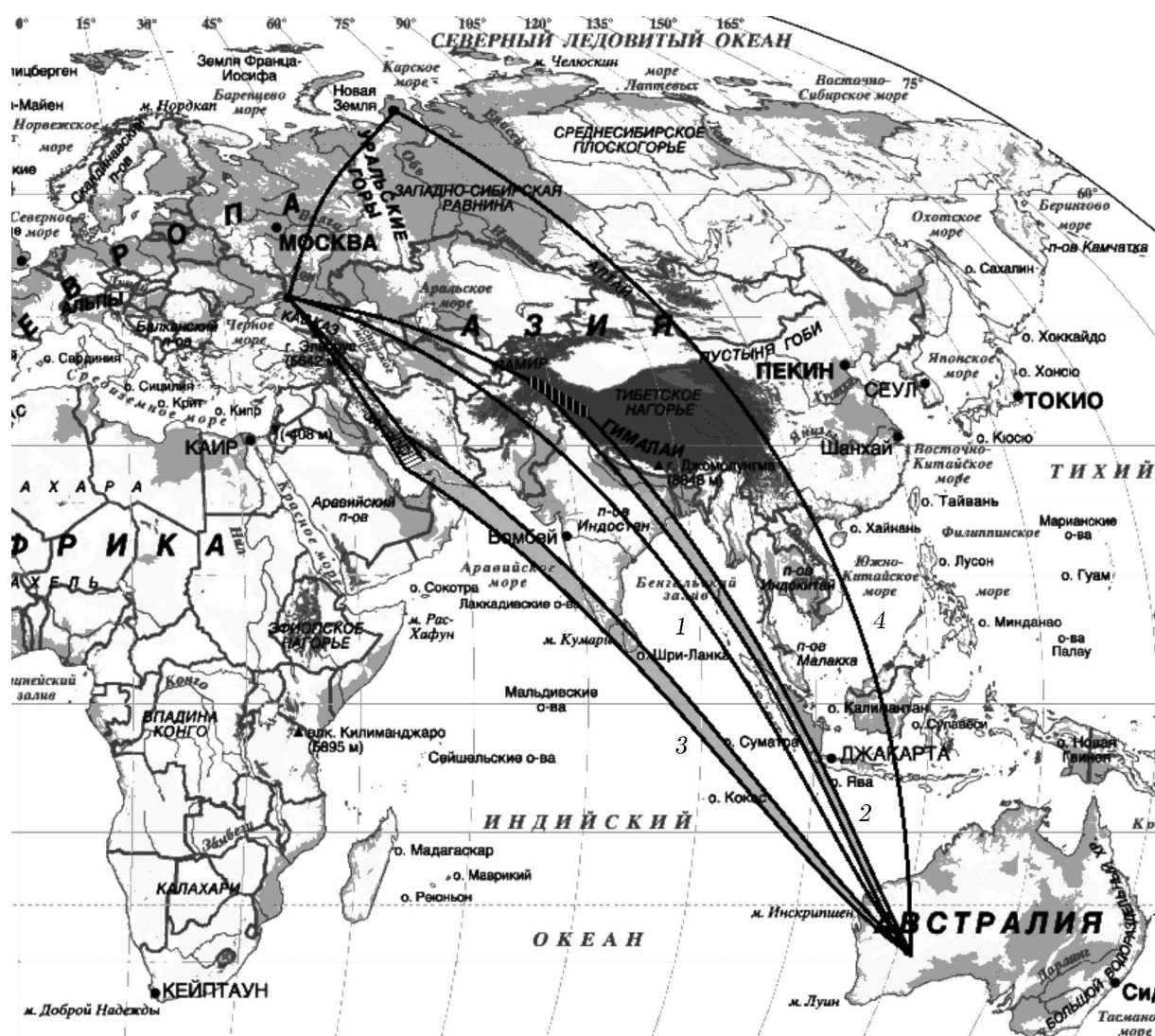


Рис. 7. Схема эксперимента и пути распространения сигналов: 1 — прямой сигнал; 2, 3 — боковые сигналы с отражением от горного массива Гималаи и Иранского нагорья соответственно; 4 — аномальный сигнал с большой задержкой с рассеянием радиоволн от неоднородностей высокоширотной ионосферы северного полушария

отражении от Земли, а для волноводных траекторий ещё и меньше потери на поглощение, поскольку радиоволны распространяются выше основных поглощающих слоёв ионосферы. В пользу рикошетирующего (волноводного) механизма распространения радиоволн на участке трассы Лейвертон—область рассеяния указывает тот факт, что амплитуды прямого и аномального сигналов сопоставимы. Это означает, что потери на рассеяние на ионосферных неоднородностях в области северной стенки ионосферного провала в определённой мере компенсируются меньшими потерями рикошетирующих (волноводных) мод при их распространении от Лейвертона до области рассеяния в приподнятом над Землёй ионосферном канале. Для захваченных в ионосферный канал рикошетирующих (волноводных) траекторий на частотах $5 \div 12$ МГц проводился расчёт ракурсного рассеяния радиоволн на неоднородностях высокоширотной ионосферы и учитывались те траектории, которые после рассеяния попадают в пункт приёма. Расчёт проводился по методике, изложенной в [11]. На рис. 9 для различных частот показаны лучевые траектории на участке трассы область рассеяния—Ростов-на-Дону. Согласно расчётам по условиям ракурсного

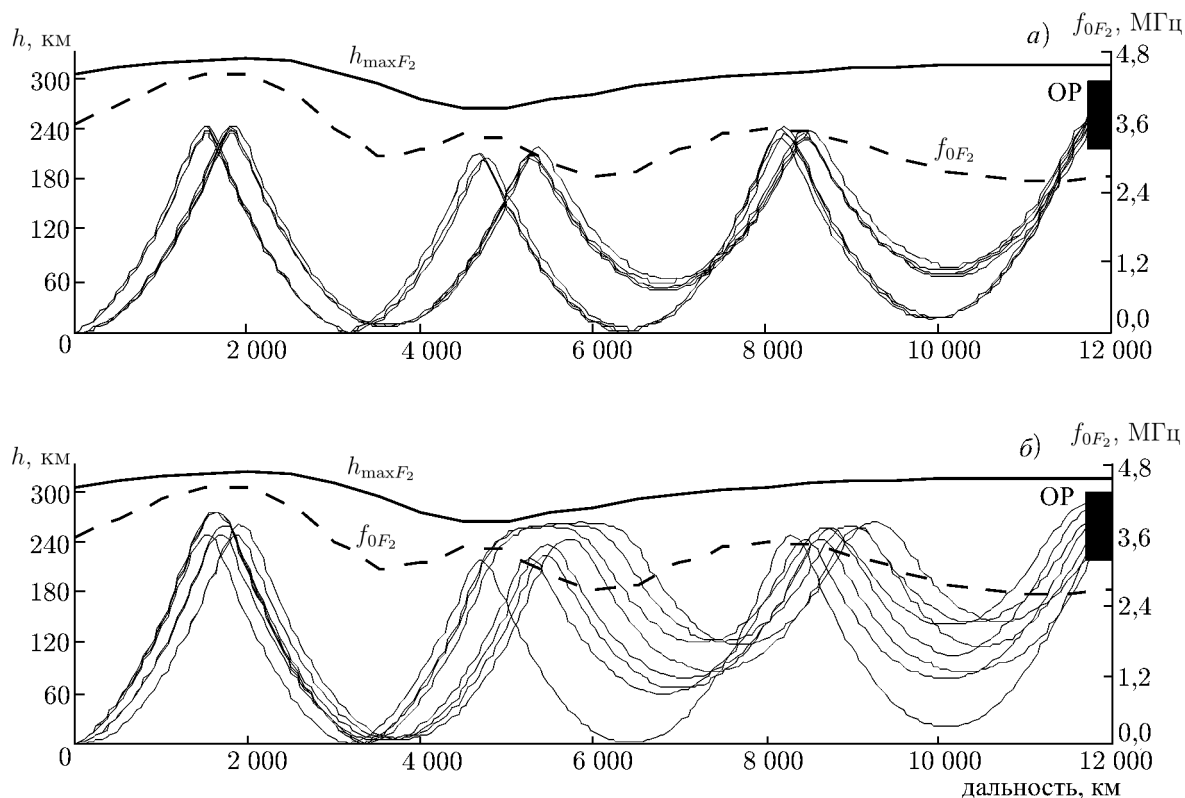


Рис. 8. Лучевые траектории на трассе Лейвертон—область рассеяния (ОР) 21:27 MSK 11.01.2010: а) — частоты 5÷7 МГц, б) — частоты 8÷12 МГц. Углы излучения $1^\circ \div 5^\circ$

рассеяния и последующего полутораскачкового распространения из всего диапазона частот рикошетирующих (волноводных) траекторий в приёмный пункт попадают траектории только на частотах 5÷7 МГц, что хорошо согласуется с результатами наблюдений. Обрезание верхних частот из диапазона рикошетирующих (волноводных) траекторий обусловлено как ракурсными условиями рассеяния, так и низкими критическими частотами ионосферы на участке трассы область рассеяния—Ростов-на-Дону, учитывая, что из-за большого расстояния от области рассеяния до приёмного пункта (порядка 3 000 км) для попадания в приёмный пункт рассеянный сигнал должен отразиться от Земли и ионосферы. Таким образом, результаты расчёта хорошо согласуются с экспериментальными данными, что отражает адекватность используемой физической модели реальным условиям распространения радиоволн на протяжённой трансэкваториальной трассе.

Важно отметить, что мелкомасштабные (метровые и декаметровые) неоднородности, ответственные за появление рассеянных сигналов, диссипируют в течение нескольких секунд (десятков секунд) и существуют только в области источника неоднородностей. Поэтому диагностика таких неоднородностей с помощью ЛЧМ-ионозонда/целенгатора в конфигурации бистатического коротковолнового радара представляет интерес для локализации источника генерации таких неоднородностей. С другой стороны, наличие в высокоширотной ионосфере интенсивных мелкомасштабных неоднородностей позволяет использовать их в качестве детектора для выявления на трассах большой протяжённости рикошетирующих (волноводных) мод распространения и вывода радиоволн на поверхность Земли за счёт рассеяния.

В предположении, что аномальные сигналы с задержками 2÷3 мс, принятые с азимутов 100° и $145^\circ \div 150^\circ$ обусловлены боковым отражением радиоволн от горного массива Гималаи и Иранского нагорья соответственно, мы провели расчёты лучевых траекторий для таких сигналов. Согласно

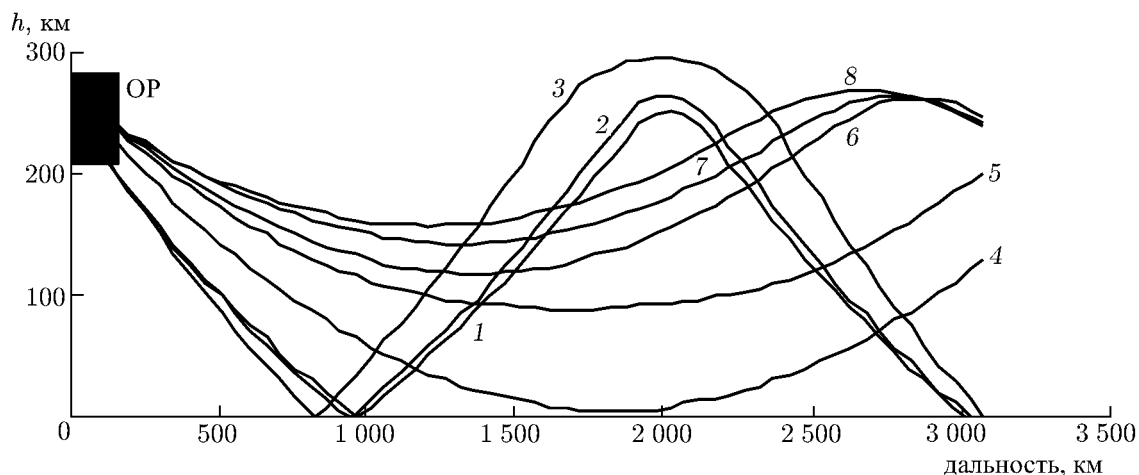


Рис. 9. Лучевые траектории на трассе область рассеяния (ОР)—Ростов-на-Дону 21:27 MSK 11.01.2010. Маркеры 1÷8 соответствуют рабочим частотам 5, 6, ..., 12 МГц

расчётам ответственные за боковое отражение области на Земле расположены на Иранском нагорье на расстоянии $2000 \div 2700$ км от приёмного пункта со средним азимутом угла прихода около 147° и в Гималаях на расстоянии $3000 \div 3700$ км от приёмного пункта с азимутом угла прихода около 100° . Эти области схематично показаны на рис. 7.

Таким образом, использование ЛЧМ-ионозонда/пеленгатора в исследованиях дальнего и сверхдальнего распространения коротких радиоволн позволяет на качественно новом уровне осуществлять идентификацию различных сигналов и делать обоснованные выводы о природе и механизмах распространения аномальных сигналов.

ВЫВОДЫ

Основные результаты работы состоят в следующем.

Впервые проведён эксперимент по сверхдальному зондированию ионосферного канала на трансэкваториальной трассе с помощью ЛЧМ-ионозонда/пеленгатора. Обнаружены аномальные сигналы и определён механизм их распространения. Показано, что регистрируемые в дневные часы диффузные сигналы с задержкой $2 \div 3$ мс с амплитудой на $20 \div 25$ дБ меньше амплитуды прямого сигнала, принимаемые с азимутов около 100° и $145^\circ \div 150^\circ$, обусловлены боковым отражением радиоволн от горного массива Гималаи и Иранского нагорья соответственно. Установлено, что аномальные сигналы с задержкой $11 \div 12$ мс с амплитудой, сравнимой с амплитудой прямого сигнала, принимаемые в спокойных геомагнитных условиях в вечернее и ночное время с максимумом вероятности появления в 20:24 MSK с азимутов $15^\circ \div 21^\circ$, обусловлены рассеянием рикошетирующих мод на мелкомасштабных магнитно-ориентированных неоднородностях, расположенных на высотах F -слоя высокоширотной ионосферы в области северной стенки главного ионосферного провала ионизации на геомагнитных широтах $66^\circ \div 67^\circ$ с. ш.. По результатам проведённого эксперимента и моделирования можно сделать вывод, что на трассе большой протяжённости достаточно регулярно реализуется механизм трансформации скачковых траекторий в рикошетирующие и волноводные моды за счёт влияния градиентов электронной концентрации вдоль трассы распространения. Показано, что рассеяние радиоволн на неоднородностях в области северной стенки ионосферного провала может являться эффективным механизмом вывода радиоволн из ионосферного волновода на поверхность Земли. Указанные факторы необходимо учитывать при работе радиоэлектронных систем различного назначения на трассах большой про-

тяжёлности.

В заключение заметим, что результаты проведённого эксперимента продемонстрировали уникальные возможности нового инструмента — ЛЧМ-ионозонда/пеленгатора — для одновременного измерения в широкой полосе частот ключевых характеристик ионосферного канала. ЛЧМ-ионозонд/пеленгатор открывает новые горизонты для решения научных и практических задач радиопеленгации, радионавигации, радиолокации и радиосвязи и может быть использован для обеспечения эффективного функционирования радиоэлектронных систем различного назначения, что особенно важно для обширных стратегических районов Крайнего Севера, характеризующихся сложными условиями распространения радиоволн, подверженных воздействию магнитно-ионосферных возмущений.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 09–02–00109).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гуревич А. В., Цедилина Е. Е. Сверхдальнее распространение коротких радиоволн. М.: Наука, 1979. 246 с.
2. Uryadov V. P., Ryabova N. V., Ivanov V. A., Shumaev V. V. // J. Atm. Terr. Phys. 1995. V. 57, No. 11. P. 1261.
3. Куркин В. И., Носов В. Е., Матюшонок С. М. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2000. Т. 43, № 10. С. 843.
4. Вертоградов Г. Г., Урядов В. П., Вертоградов В. Г., Шевченко В. Н. // Электромагнитные волны и электронные системы. 2007. Т. 12, № 5. С. 25.
5. Вертоградов Г. Г., Урядов В. П., Вертоградова Е. Г., // Труды XIII Международной научно-техн. конф. «Радиолокация, навигация, связь», Воронеж, 2007. Т. 2. С. 1203.
6. Урядов В. П., Вертоградов Г. Г., Вертоградов В. Г. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2009. Т. 52, № 4. С. 267.
7. Moffett R. J., Quegan S. J. // Atm. Terr. Phys. 1983. V. 45. P. 315.
8. Moller H. G. // J. Atm. Terr. Phys. 1974. V. 36. P. 1487.
9. Tsunoda R. T. // Rev. Geophys. 1988. V. 26, No. 4. P. 719.
10. Понятов А. А., Урядов В. П., Батухтин В. И. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 1999. Т. 42, № 12. С. 1136.
11. Понятов А. А., Урядов В. П. Компьютерное моделирование ионосферного распространения коротких радиоволн: Препринт № 428 НИРФИ. Нижний Новгород, 1996. 20 с.

Поступила в редакцию 25 февраля 2010 г.; принята в печать 26 марта 2010 г.

ULTRALONG-RANGE SOUNDING OF THE IONOSPHERIC HF CHANNEL USING AN IONOSONDE/DIRECTION FINDER WITH CHIRP MODULATION OF THE SIGNAL

G. G. Vertogradov, V. P. Uryadov, E. G. Vertogradova, and A. A. Ponyatov

We present the results of experimental studies of propagation of short radio waves on a long transequatorial path of Laverton (Australia) — Rostov-on-Don, which were obtained with the help of an ionosonde/direction finder with chirp modulation of the signal. It is shown that conditions for propagation of anomalous signals by means of sideband reflection of radio waves from the Himalayan

Hills and the Plateau of Iran and also due to scattering of radio waves from the high-latitude ionosphere of the northern hemisphere are realized on the given path. The propagation of radio waves is modeled with allowance for their scattering by anisotropic magnetic field-aligned irregularities of a high-latitude ionosphere, which are located on the northern wall of the main ionospheric trough of the F layer. It is shown that the results of the experiment agree well with the calculated data.