

Сверхдальнее зондирование ионосферного канала с помощью ЛЧМ ионозонда/пеленгатора

В.П. Урядов¹, Г.Г. Вертоградов², Е.Г. Вертоградова², А.А. Понятов¹

1 – ФГНУ Научно-исследовательский радиофизический институт, Нижний Новгород, ул. Б.Печерская, 25/12а, uryadovvp@nirfi.sci-nnov.ru

2 – ФГОУ ВПО Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, ул. Зорге, 5, vgg@bmail.ru

Представлены результаты экспериментальных исследований распространения коротких радиоволн на трансэкваториальной трассе ЛЧМ зондирования Лейвертон (Австралия) – Ростов-на-Дону. 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 счет рассеяния рикошетирующих мод от высокоширотной ионосферы северного полушария. Проведено моделирование распространения радиоволн с учетом рассеяния на анизотропных магнитно-ориентированных неоднородностях высокоширотной ионосферы, расположенных на северной стенке главного ионосферного провала F-слоя. Показано, что результаты эксперимента хорошо согласуются с расчетными данными.

Results of experimental researches of short radio waves propagation on transequatorial LFM sounding path Laverton (Australia) – Rostov-Don are presented. It is shown that on the given path conditions for propagation of abnormal signals by means of side reflection of radio waves from hill of the Himalaya and plateau of Iran are realized and also due to scattering radio waves from high-latitude ionosphere of northern hemisphere. Modeling propagation of radio waves is carried out in view of scattering on magnetic field-aligned irregularities of high-latitude ionosphere, located on northern wall of main ionospheric trough of the F-layer. It is shown that results of experiment well be coordinated to the calculated data.

Введение

Значительный импульс исследования сверхдальнего распространения радиоволн получили благодаря использованию современной техники широкополосного ЛЧМ зондирования, обладающей высокой помехозащищенностью. Вместе с тем, многообразие ионосферных условий, влияние ионосферных возмущений естественного и искусственного происхождения на характеристики сигналов затрудняют в ряде случаев интерпретацию экспериментальных данных сверхдальнего распространения радиоволн. В этой связи использование для сверхдальнего зондирования ЛЧМ ионозонда/пеленгатора, способного, наряду, с дистанционно-частотными (ДЧХ) и амплитудно-частотными (АЧХ) характеристиками измерять угловые-частотные характеристики (УЧХ) сигналов существенно расширяет возможности исследования особенностей сверхдальнего распространения радиоволн.

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

Результаты эксперимента и моделирования

Эксперимент по сверхдальному зондированию ионосферного канала проводился с 5.12.2009г. по 12.01.2010г. В качестве передатчика ЛЧМ сигналов использовалась станция, расположенная в Лейвертон (28,628 ° S, 122,403 ° E), Австралия. Режим работы станции: диапазон частот 5 – 30 МГц, скорость перестройки частоты 125 кГц/с, повторяемость излучения через 4 минуты. Прием ЛЧМ сигналов осуществлялся в Ростове-на-Дону с помощью ЛЧМ ионозонда/пеленгатора, который позволяет

измерять полный набор характеристик ионосферного радиоканала (дистанционно-частотные (ДЧХ), амплитудно-частотные (АЧХ) и угловые частотные (УЧХ) характеристики). Протяженность трансэкваториальной трассы Лейвертон (Австралия) – Ростов-на-Дону составляет 11790 км.

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 протяженной трансэкваториальной трассе. Отметим, что во время эксперимента была спокойная геомагнитная обстановка, 3-х часовой магнитный индекс K_p составлял значения $\sim 1-2$. Нам, в первую очередь интересуют случаи, когда, наряду с прямым сигналом, распространяющимся по дуге большого круга между передатчиком и приемником, регистрировались аномальные сигналы с большей задержкой, чем задержка прямого сигнала. Характерные примеры ДЧХ, АЧХ и УЧХ с аномальными сигналами показаны на рис. 1-3. Вертикальные полосы на ионограммах с отсутствием сигнала в окрестности частот ~ 6 и 7.3 МГц обусловлены воздействием сильных станционных помех. 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 мск на частотах $\sim 16 - 20.5$ МГц с азимутом угла прихода $\alpha \approx 100^\circ$ и задержкой $\sim 1-2$ мс относительно прямого сигнала (см. рис.1), амплитуда сигнала была на 15-20 дБ меньше амплитуды прямого сигнала; в 11:35 мск на частотах $\sim 20 - 25$ МГц с азимутом угла прихода $\alpha \approx 145-150^\circ$ и задержкой $\sim 2-3$ мс (см. рис.2), амплитуда сигнала была на 20-25 дБ меньше амплитуды прямого сигнала.

В вечернее время часто регистрировался интенсивный аномальный сигнал на частотах $\sim 5 - 7$ МГц с азимутом угла прихода $\alpha \approx 20^\circ$ и задержкой $\sim 11-12$ мс относительно прямого сигнала. Типичный пример ДЧХ, АЧХ и УЧХ с наличием такого аномального сигнала для 21:27 мск показан на рис.3. Этот сигнал наблюдался в основном в вечернее время с наибольшей появляемостью в 20:00 – 24:00 мск и в дальнейшем основное внимание мы уделим анализу аномальных (боковых) сигналов с большой задержкой, амплитуда которых сопоставима с амплитудой прямого сигнала.

Исходя из геометрии трансэкваториальной трассы и результатов измерений ДЧХ, АЧХ и УЧХ прямых и аномальных (боковых) сигналов, мы полагаем, что диффузные аномальные сигналы с задержкой $\sim 2-3$ мс, наблюдавшиеся в дневные часы, связаны с отражением радиоволн от горного массива Гималаи для сеанса 09:23 мск и от Иранского нагорья для сеанса 11:35 мск. Что касается аномального сигнала с большой задержкой $\sim 11-12$ 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 аномальных сигналов мы провели моделирование распространения радиоволн. Расположение областей рассеяния радиоволн на Земле и в ионосфере, ответственных за появление аномальных (боковых) сигналов, мы выбирали на основе результатов измерений задержки времени прихода и азимутальных углов прихода аномальных сигналов с учетом моделирования распространения радиоволн. Согласно измерениям и расчетам, за боковой сигнал с большой задержкой ответственна область высокоширотной ионосферы с географическими координатами подионосферной точки центра этой области 71°N , $68,5^\circ\text{E}$ (геомагнитные координаты $66,25^\circ\text{N}$, $144,67^\circ\text{E}$). Для условий спокойной ионосферы эта область совпадает с положением северной стенки главного ионосферного провала (ГИП) ионизации, характеризуемого наличием в вечерние и ночные часы местного времени интенсивных мелкомасштабных неоднородностей

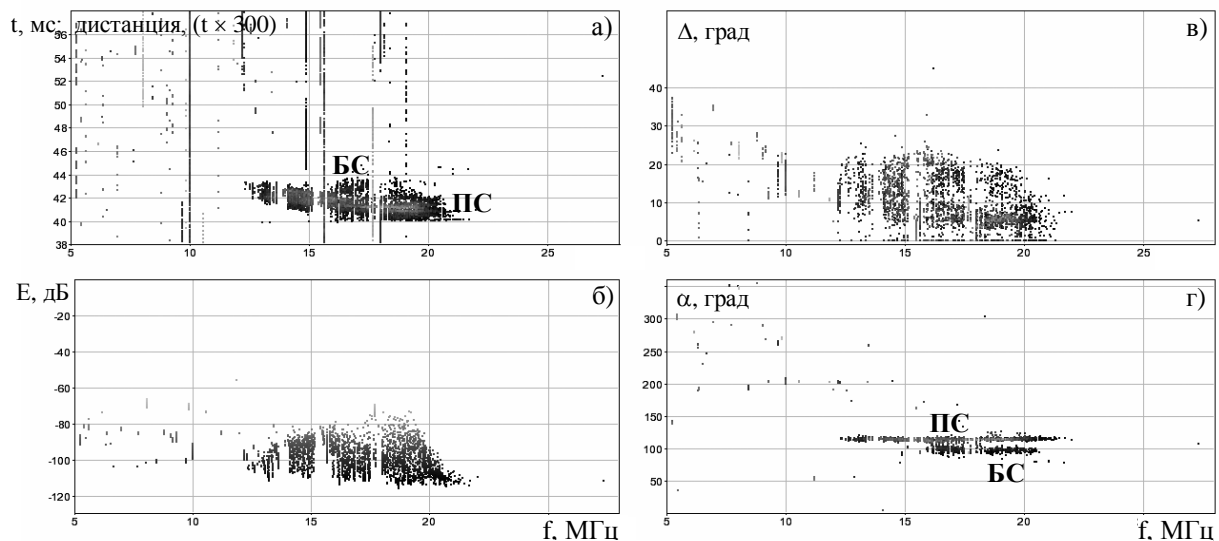


Рис. 1. ДЧХ (а), АЧХ (б) и УЧХ ((в) - угол места Δ , (г) - азимут α) на трассе зондирования Лейвертон (Австралия) – Ростов-на-Дону. 12.01.2010г., 09:23 мск. ПС – прямой сигнал, БС – боковой сигнал

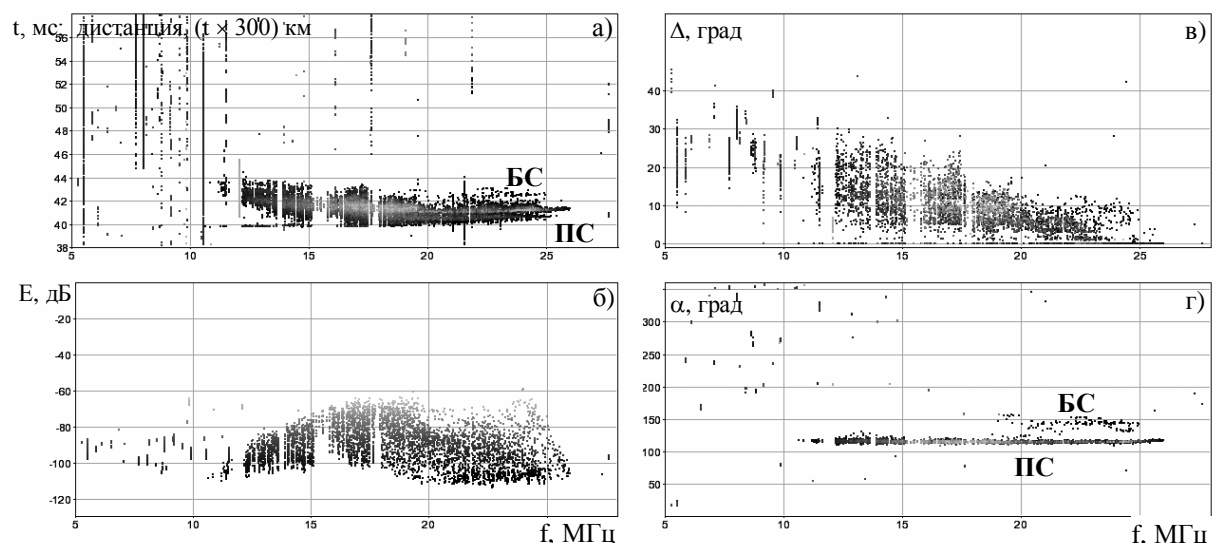


Рис. 2. ДЧХ (а), АЧХ (б) и УЧХ ((в) - угол места Δ , (г) - азимут α) на трассе зондирования Лейвертон– Ростов-на-Дону. 12.01.2010г., 11:35 мск. ПС – прямой сигнал, БС – боковой сигнал

электронной концентрации, ответственных за обратное рассеяние КВ сигналов. Геометрия трассы и возможные пути распространения радиосигналов показаны на рис.4.

Согласно расчетам, на частотах 5-7 МГц за счет 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 10-12 МГц имеет место захват радиоволн на волноводные траектории типа "шепчущей галереи" с минимальной высотой прохождения лучевой траектории над поверхностью Земли $h \geq 100$ км. 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

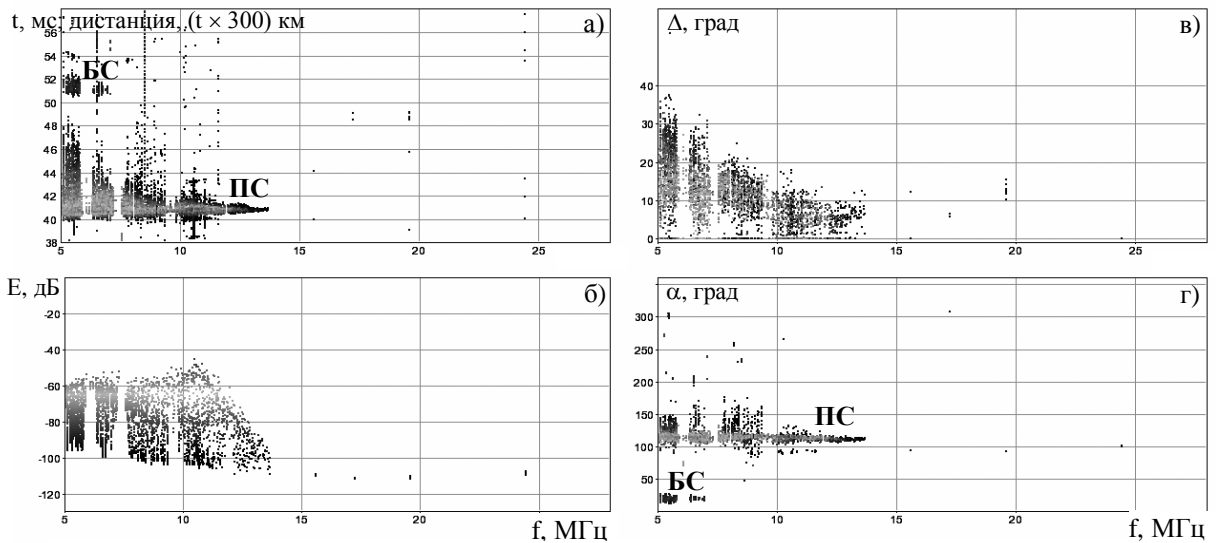


Рис. 3. ДЧХ (а), АЧХ (б) и УЧХ (в) - угол места Δ , (г) - азимут α на трассе зондирования Лейвертон – Ростов-на-Дону. 11.01.2010г., 21:27 мск. ПС – прямой сигнал, БС – боковой сигнал



Рис. 4. 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

потери при отражении от Земли, а для волноводных траекторий еще и меньше потери на поглощение, поскольку радиоволны распространяются выше основных поглощающих слоев ионосферы. В пользу рикошетирующего (волноводного) механизма распространения радиоволн на участке трассы Лейвертон – область

рассеяния указывает тот факт, что амплитуды прямого и аномального сигналов сопоставимы. То есть потери на рассеяние на ионосферных неоднородностях в области северной стенки ГИП в определенной мере компенсируются меньшими потерями рикошетирующих (волноводных) мод при их распространении от Лейвертона до области рассеяния в приподнятом над Землей ионосферном канале. Для захваченных в ионосферный канал рикошетирующих (волноводных) траекторий на частотах 5 – 12 МГц проводился расчет ракурсного рассеяния радиоволн на неоднородностях высокоширотной ионосферы и учитывались те траектории, которые после рассеяния попадают в пункт приема. Согласно расчетам, по условиям ракурсного рассеяния и последующего 1,5 скачкового распространения из всего диапазона частот рикошетирующих (волноводных) траекторий в приемный пункт попадают траектории только на частотах $\sim 5 - 7$ 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 приемного пункта ~ 3000 км для попадания в приемный пункт рассеянный сигнал должен отразиться от Земли и ионосферы. Таким образом, результаты расчета хорошо согласуются с экспериментальными данными, что отражает адекватность используемой физической модели реальным условиям распространения радиоволн на протяженной трансэкваториальной трассе.

Выводы

1. Впервые проведен эксперимент по сверхдальному зондированию ионосферного канала на трансэкваториальной трассе с помощью ЛЧМ ионозонда/пеленгатора.
 2. Показано, что регистрируемые в дневные часы диффузные сигналы с задержкой $\sim 2-3$ мс с амплитудой на 20-25 дБ меньше амплитуды прямого сигнала, принимаемые с азимутов $\sim 100^\circ$ и $145-150^\circ$, обусловлены боковым отражением радиоволн от горного массива Гималаи и Иранского нагорья соответственно.
 3. Установлено, что аномальные сигналы с задержкой $\sim 11-12$ мс с амплитудой сравнимой с амплитудой прямого сигнала, принимаемые в спокойных геомагнитных условиях в вечернее и ночное время с максимумом появляемости в 20^h-24^h мск с азимутов $\sim 18-21^\circ$, 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 $\sim 66-67^\circ N$.
 4. По результатам проведенного эксперимента и моделирования можно сделать вывод, что на трассе большой протяженности достаточно регулярно реализуется механизм трансформации скачковых траекторий в рикошетирующие и волноводные моды за счет влияния на траекторные характеристики градиентов электронной концентрации вдоль трассы распространения. Показано, что рассеяние радиоволн на неоднородностях в области северной стенки ГИП может являться эффективным механизмом вывода радиоволн из ионосферного волновода на поверхность Земли.
- Результаты проведенного эксперимента продемонстрировали уникальные возможности нового инструмента – ЛЧМ ионозонда/пеленгатора для решения научных и практических задач радиопеленгации, радионавигации и радиолокации.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 09-02-00109.