

УДК 550.388.2

—
 . . . 1, . . . 2, . . . 1, . . . 1,
 . . . 1, . . . 3
 1 . . . , . - -
 2 - . . , .
 3 , .

Получена 7 декабря 2010 г.

. Дано описание работы ионозонда-радиопеленгатора с использованием линейно-частотно-модулированного сигнала. Представлены результаты экспериментальных исследований особенностей распространения радиоволн на трассах различной протяженности, ориентации в естественной и искусственно-возмущенной ионосфере с помощью ионозонда-радиопеленгатора. Сформулированы предложения по созданию российского аналога системы SuperDARN на основе уникального инструмента – ионозонда-радиопеленгатора. С этой целью предлагается развернуть северный и среднеширотный эшелоны приемо-передающих станций, оснащенных ионозондами-радиопеленгаторами.

: ЛЧМ-сигнал, ионозонд-радиопеленгатор, рассеяние, волновод, моделирование

Эффективность работы радиоэлектронных систем различного назначения в значительной мере определяется возможностью адаптации таких систем к условиям распространения радиоволн в реальном времени. В последние годы, благодаря бурному развитию микроэлектроники, вычислительной техники,

цифровой обработки сигналов созданы современные диагностические системы, обладающие высокой помехозащищенностью. К ним с полным правом можно отнести ЛЧМ ионозонд [1]. Использование таких систем в ионосферных исследованиях и практике радиосвязи позволило получить новые данные об особенностях дальнего, в частности, волноводного распространения коротких радиоволн в естественной и искусственной ионосфере.

С математической точки зрения ЛЧМ ионозонд на приеме реализует во временной области операцию перемножения принятого сигнала $x_r(t)$ с сигналом гетеродина приемника $x_g(t)$

$$x(t) = x_g(t)x_r^*(t).$$

Дальнейшая обработка разностного сигнала $x(t)$, зависящего от разностной частоты $\Delta f = f_g - f_r$, проводится в спектральной области. Такая обработка обеспечивает определение параметров передаточной характеристики канала связи $H(\omega)$ [7]. При этом для спектра $S(\omega)$ разностного сигнала имеет место равенство [7]:

$$S(\omega) = \frac{a_g a_t}{8\mu} e^{-i\frac{\omega^2}{2\mu}} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i\frac{\omega\omega''}{\mu}} \tilde{S}_{t_1, t_2}(\omega + \omega'') \tilde{S}_{\frac{t_t}{2}, \frac{t_t}{2}}^*(\omega'') H^*(\omega_0 + \omega'') d\omega''. \quad (1)$$

Здесь ω_0 – центральная несущая частота в полосе спектра импульса зондирования ΔF . Считается также, что принятый импульс может иметь длительность $T' = t_2 - t_1$ большую, чем излученный t_t (т.е. $T' > t_t$), a_t и a_g – амплитуды соответственно излученного ЛЧМ импульса и сигнала гетеродина, $\mu = 2\pi\mu_0$ – скорость перестройки частоты, а функция $\tilde{S}_{t_1, t_2}(\omega)$ выражается через интегралы Френеля C, S:

$$\begin{aligned} \tilde{S}_{t_1, t_2}(\omega) &= C(z_1) - C(z_2) + i[S(z_1) - S(z_2)], \\ z_1 &= \sqrt{2/\mu_0}(\Delta f - \mu_0 t_1), \quad z_2 = \sqrt{2/\mu_0}(\Delta f - \mu_0 t_2), \quad \omega = 2\pi\Delta f. \end{aligned} \quad (2)$$

Кроме того, предполагается, что ЛЧМ импульс излучается на интервале времени $(-0.5t_t, 0.5t_t)$, а принимается на промежутке (t_1, t_2) . Причем для ЛЧМ сигнала с базой $\tilde{B} = \Delta F t_t \gg 1$ линейные комбинации в квадратных скобках представляют собой функции, близкие к прямоугольным с шириной в частотной области, равной $\Delta F \approx \mu_0 T'$.

Будем считать, что для зондирования используются ЛЧМ импульсы, ширина спектра которых не превышает полосу когерентности канала. Тогда мгновенная передаточная характеристика однолучевого канала записывается в окрестности центральной частоты зондирования ω_0 в виде:

$$H(\omega) = a_j e^{-i(\Psi_j + \tau_j(\omega - \omega_0))}, \quad (3)$$

где a_j , Ψ_j – амплитуда и фаза j -го луча, τ_j – его групповая задержка.

Учитывая, что для ЛЧМ-сигнала зондирования выполняется условие $\tilde{B} \gg 1$, используя асимптотические разложения интегралов Френеля, для спектра (1) получаем выражение:

$$S(\omega) = a_t a_g a_j e^{i[\Psi_j + 0.5\mu t_0^2 - \omega t_0]} \begin{cases} \frac{\sin[(\omega - \mu t_0)(t_t + (\omega - \mu t_0)/\mu)/2]}{2(\omega - \mu t_0)}, & \frac{\omega}{\mu t_0} \leq 1; \\ \frac{\sin[(\omega - \mu t_0)(t_t - (\omega - \mu t_0)/\mu)/2]}{2(\omega - \mu t_0)}, & \frac{\omega}{\mu t_0} \geq 1. \end{cases} \quad (4)$$

Здесь t_0 – время группового запаздывания для центральной спектральной составляющей обрабатываемой выборки ЛЧМ-сигнала. Из выражения (4) следует, что при приеме ЛЧМ сигналов амплитуда в максимуме спектральной плотности мощности пропорциональна амплитуде парциального луча $|S(\omega = \mu t_0)| = 0.25 a_t a_g a_j t_t$, а фаза с точностью до постоянного аддитивного слагаемого совпадает с его начальной фазой $\arg\{S(\omega = \mu t_0)\} = \Psi_j + 0.5\mu t_0^2$. Последнее свойство в традиционных ЛЧМ ионозондах не используется, а мы положим его в основу измерения

где Ψ_{0j} – начальная фаза, не зависящая от координат приемной антенны, $\mathbf{k}_j = \frac{2\pi}{\lambda} \{-\cos\Delta_j \sin\alpha_j, -\cos\Delta_j \cos\alpha_j, -\sin\Delta_j\}$ – волновой вектор, λ – длина волны, Δ_j, α_j – угол места и азимут j -го парциального луча. В этом случае разность фаз напряжений $\Delta\Psi_{jnk}$, наводимых j -м лучом на n -ой и k -ой антеннах не зависит от Ψ_{0j} и выбора начала системы координат, а определяется только углами прихода и ориентацией вектора $\Delta\mathbf{r}_{nk} = \mathbf{r}_n - \mathbf{r}_k$:

$$\Delta\Psi_{jnk} = \Psi_{jn} - \Psi_{jk} = \mathbf{k}_j \Delta\mathbf{r}_{nk}. \quad (6)$$

Измеряя множество значений $\{\Delta\Psi_{jnk}\}$ в пространственно разнесенных антенных элементах, можно определить двухмерные угловые координаты парциальных лучей любым классическим интерферометрическим способом [8]. Многоканальный ЛЧМ ионозонд благодаря оптимальной обработке широкополосных сигналов позволяет разделить суммарное интерференционное поле на парциальные лучи по групповой задержке. Как следствие, множество измеренных разностей фаз $\{\Delta\Psi_{jnk}\}$ разделенных парциальных лучей свободны от интерференционных погрешностей, которые в классических КВ пеленгаторах, построенных по интерферометрическому принципу, приводят к ошибкам измерения как азимута, так и угла места [8].

Наиболее просто интерферометрический метод определения двухмерных угловых координат (азимут, угол места) источников радиоизлучения реализуется при использовании двухканального когерентного радиоприемного устройства и двухканального АЦП [9].

В состав ионозонда-радиопеленгатора входят два радиоприемника с общим гетеродином, в качестве которого используется перестраиваемый ЛЧМ генератор. В качестве антенн применяется N - элементная антенная решетка, состоящая из N вертикальных штыревых антенн, которая используется для определения амплитудно-фазового распределения поля радиоволн на апертуре антенной решетки и оценки углов прихода различных лучей путем Фурье-синтеза диаграммы направленности. Одна из антенн решетки (опорная антенна)

через разветвитель постоянно подключена на вход 1-го радиоприемника РПУ1 (опорный канал), со второго выхода разветвителя сигнал с опорной антенны подается на один из входов антенного коммутатора, на остальные входы коммутатора подключены остальные $N-1$ элементы антенной решетки. С выхода антенного коммутатора сигнал подается на вход 2-го радиоприемника РПУ2 (предметный канал). Антенная решетка состоит из 16 вертикальных штыревых антенн высотой 9 м, размещенных на площадке 80x80 м.

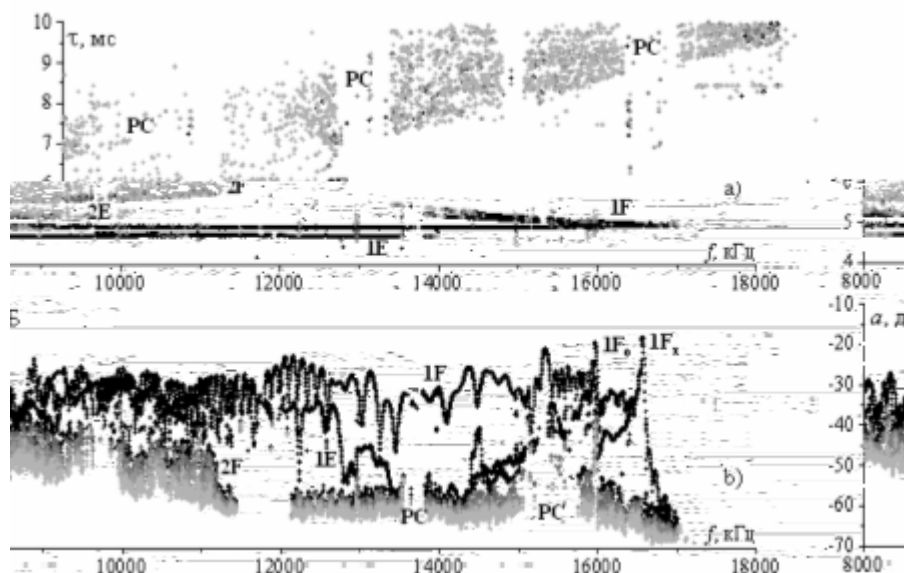
Разветвитель сигнала опорной антенны предназначен для калибровки фазовой неидентичности каналов двух когерентных радиоприемников РПУ1 и РПУ2.

С выхода промежуточной частоты двух приемников РПУ1 и РПУ2 сигнал поступает на 2-ух канальный АЦП, который предназначен для синхронной оцифровки сигналов с двух приемников.

Обработка оцифрованного разностного сигнала, осуществляется с помощью многопоточного вычислителя, где осуществляется оценка спектральной плотности мощности (СПМ) сигнала и шума многооконным методом (МТМ-методом), обнаружение лучей, определение их числа n , комплексных амплитуд α_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 $(S/N)_j(f)$, определение наименьшей наблюдаемой (ННЧ) и максимальной наблюдаемой (МНЧ) частоты, интервалов многолучевости, интервала временного рассеяния $\Delta\tau$, вероятности ошибки, надежности связи [10].

С помощью многопоточного вычислителя осуществляется измерение двухмерных угловых координат каждого луча путем Фурье-синтеза диаграммы направленности антенны [7].

Ионозонд-радиопеленгатор функционирует с 2006г. С его помощью получены новые данные об особенностях распространения радиоволн на трассах различной протяженности как в естественной ионосфере, так и в условиях воздействия на ионосферу мощного радиоизлучения [7, 11, 12].

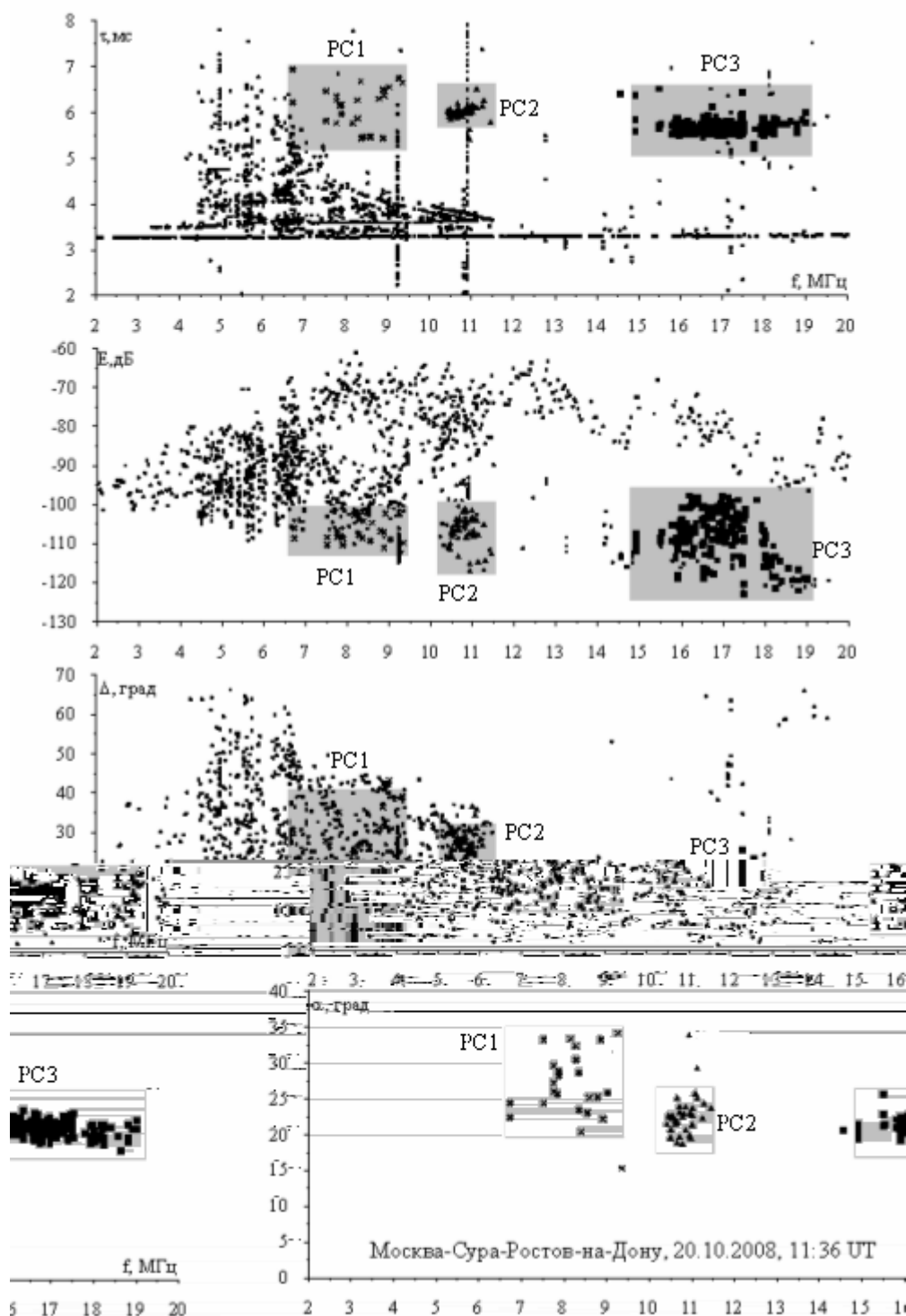


1. ДЧХ (а) и АЧХ (б) на трассе наклонного ЛЧМ зондирования Кипр–Ростов-на-Дону; 21.10.2006 г, 13:20 UT; отмечены моды 1E, 2E, 1F, 2F и PC – рассеянный сигнал.

На рис.1 показан пример ионограммы на трассе Кипр–Ростов-на-Дону, когда в широкой полосе частот наблюдаются следы мощного рассеянного сигнала типа ВНЗ. Измерения УЧХ позволили оценить азимут прихода рассеянного сигнала, позиционировать следы рассеянных мод, проследить изменения азимута от частоты и объяснить их природу рассеянием радиоволн при отражении от поверхности Земли. Получено, что на поверхности Земли наблюдаются несколько характерных областей рассеяния. Одна имеет азимут 160-170°, вторая – 140-150°, третья – 130-135°. Характерные групповые запаздывания для первой области составляют 7-8 мс, для второй – 8-10 мс, для третьей – 10-11 мс. Часто при увеличении частоты азимут прихода рассеянного сигнала с увеличением групповых задержек от 8 мс до 11 мс монотонно убывает от 170° до 130°. Это свидетельствует о смещении рассеивающей

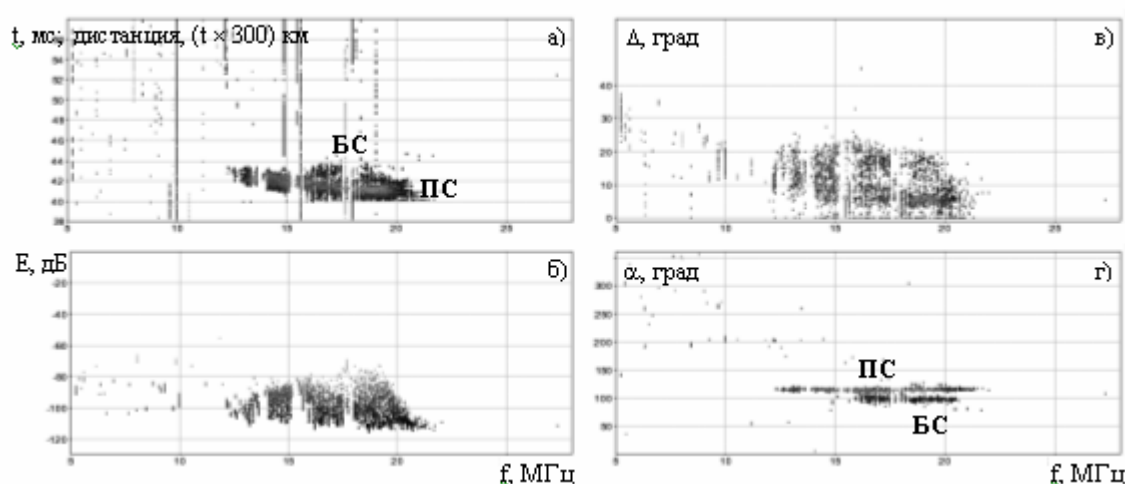
области и удалении ее по расстоянию от пунктов излучения и приема. В других случаях азимут прихода рассеянного сигнала изменяется от 170° до 150° , а групповая задержка возрастает от 7 мс до 9 мс. Подобные явления могут быть объяснены рассеянием ЛЧМ-сигналов от гор Малого Кавказа (азимут из Ростова 170° - 160° и задержка ~ 7 мс), горного массива Загрос (азимут 150° - 140° и задержка 8-10 мс), гор Эльбурс (азимут 135° - 130° и задержка ~ 10 -11 мс).

Эксперимент с использованием ЛЧМ ионозонда/пеленгатора для зондирования искусственной ионосферной турбулентности проводился с 20 по 22 октября 2008г. с 11:00 – 14:00 UT. Для создания искусственных ионосферных неоднородностей использовался нагревный стенд СУРА (56.1°N , 46.1°E). Три передатчика стенда работали в синфазном режиме на частоте 4.3 МГц с эффективной мощностью ~ 80 МВт. Наклон диаграммы антенны составлял 12° к югу от зенита вдоль магнитного меридиана. Излучалась волна обыкновенной поляризации в режиме: 10 минут – излучение, 5 минут – пауза, начиная с 1-ой минуты каждого часа. Для диагностики искусственных неоднородностей осуществлялось ЛЧМ зондирование на трассе ИЗМИРАН (55.28°N , 37.22°E) – СУРА – Ростов-на-Дону (47.24°N , 39.64°E). ЛЧМ передатчик работал в диапазоне частот 2-20 МГц, скорость перестройки частоты μ_0 составляла 100 кГц/с, мощность излучения 400 Вт. Излучение ЛЧМ сигналов осуществлялось на антенну типа вертикальный полуромб в 1, 6, 11, 16, ... и т.д. минуты каждого часа. В приемном пункте Ростове-на-Дону проводились измерения дистанционно-частотных, амплитудно-частотных и угловых частотных характеристик с помощью ЛЧМ ионозонда/пеленгатора.



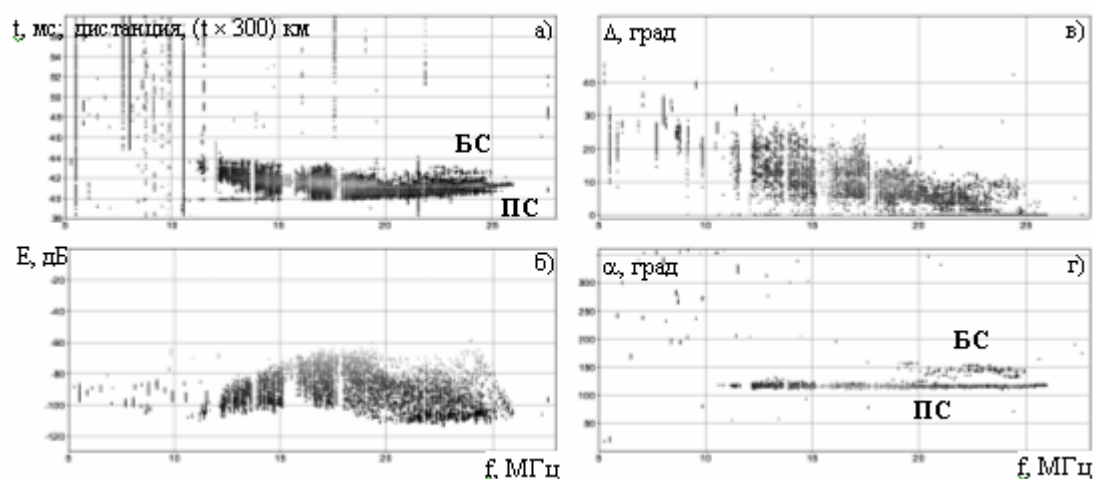
.2. Результаты пеленгования ЛЧМ сигналов 20.10.2008г. 11:36 UT. На рисунке четыре графика, сверху вниз: 1 – ДЧХ, 2 – АЧХ разделенных мод распространения, 3 – угол места (Δ , град.), 4 – азимут (α , град.), показана только область в окрестности направления на Суру (прием рассеянных сигналов - PC). \times – PC1, \blacktriangle – PC2, \blacksquare – PC3.

На рис. 2 показаны результаты работы ЛЧМ ионозонда/пеленгатора для 20.10.2008г. На рисунках четыре графика, сверху вниз: 1 – дистанционно-частотная характеристика (ДЧХ), 2 - амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) различных мод сигнала, 3 - угол места, отсчитываемый от горизонтали, 4 - азимут (показана только область в окрестности направления на Суру, откуда осуществлялся прием рассеянных сигналов). В силу особенностей построения ЛЧМ пеленгатора каждая точка на рисунках соответствует запеленгованному ЛЧМ сигналу. Точки следуют по частоте через 50кГц. На всех рисунках рассеянная компонента выделена различными маркерами. Для большей наглядности область значений характеристик рассеянных сигналов выделена на рисунках серыми прямоугольниками. Из рис.2 видно, что слабому рассеянному сигналу РС1 (частоты 6-9.5МГц) с большой дисперсией углов прихода соответствуют вертикальные углы прихода Δ в интервале $\sim 20-35^\circ$, сигналу РС2 (частоты 10-12МГц) – вертикальные углы прихода $\Delta \sim 18-32^\circ$, сигналу РС3 (частоты 15-19 МГц) – углы прихода $\Delta \sim 10-20^\circ$. Азимутальные углы прихода сигналов РС2 и РС3 лежат в интервале $\alpha \sim 20-23^\circ$, что близко к направлению на стенд СУРА (21.6°). Азимутальные углы прихода сигнала РС1 имеют значительно большую дисперсию и лежат в интервале $\alpha \sim 20-35^\circ$.



. 3. 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

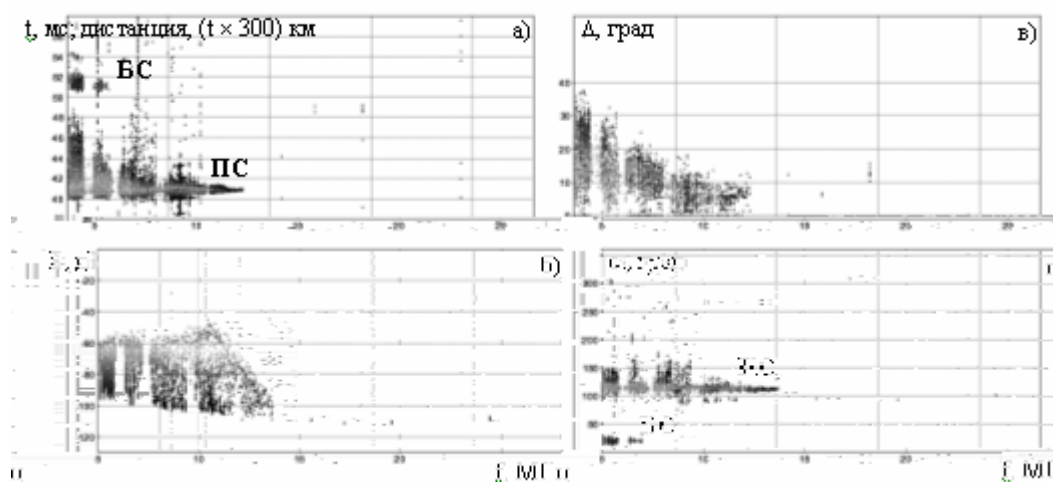
Эксперимент по трансэкваториальному зондированию ионосферного канала проводился в декабре 2009г. – апреле 2010г. В качестве передатчика ЛЧМ сигналов использовалась станция, расположенная в Лейвертон (28,6°S, 122,4°E), Австралия. Режим работы станции: диапазон частот 5 – 30 МГц, скорость перестройки частоты 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, азимут из приемного пункта на передатчик составляет 115°. Характерные примеры ДЧХ, АЧХ и УЧХ с аномальными сигналами показаны на рис. 3-5.



. 4. 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

Вертикальные полосы на ионограммах с отсутствием сигнала в окрестности частот ~ 6 и 7.3 МГц обусловлены воздействием сильных станционных помех. Как видно из рис. 3 и 4, 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 ~ 16 – 20.5 МГц с

азимутом угла прихода $\alpha \approx 100^\circ$ и задержкой $\sim 1-2$ мс относительно прямого сигнала (см. рис.3), 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.4), 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.5. В дальнейшем основное внимание мы уделим анализу аномальных (боковых) сигналов с большой задержкой, амплитуда которых сопоставима с амплитудой прямого сигнала. Этот сигнал наблюдался в основном в вечернее время с наибольшей появляемостью в 20:00 – 24:00 мск. Амплитуда аномального сигнала была сопоставима с амплитудой прямого сигнала, их отличие составляет величину $\sim 5-10$ дБ.



. 5. 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

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 09:23мск и от Иранского нагорья для сеанса 11:35 мск. Что касается аномального сигнала с большой задержкой ~ 11-12 мс и азимутом угла прихода $\alpha \approx 20^\circ$, то мы считаем, что этот сигнал обусловлен рассеянием радиоволн от неоднородностей высокоширотной ионосферы. Геометрия трассы и возможные пути распространения радиосигналов показаны на рис.6.



.6. 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

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 электронной концентрации, ответственных за обратное рассеяние КВ сигналов [13]. Формирование неоднородностей в области северной стенки ГИП связано с высыпанием электронов и градиентно-дрейфовой неустойчивостью [14].

Как уже говорилось, в данной работе основное внимание мы уделили моделированию аномального сигнала с большой задержкой $\sim 11\text{-}12$ мс с азимутом угла прихода $\alpha \approx 20^{\circ}$. Проводился расчет траекторий для прямого сигнала на трассе Лейвертон (Австралия) – Ростов-на-Дону и для бокового сигнала на трассах Лейвертон – область рассеяния и область рассеяния – Ростов-на-Дону с учетом ракурсного рассеяния радиоволн. В расчетах область рассеяния (ОР) с мелкомасштабными неоднородностями взята в виде диска радиусом 100 км на высотах F -области (200-300 км) с координатами подионосферной точки центра диска 71°N , $68,5^{\circ}\text{E}$. Горизонтальный размер диска ~ 200 км выбран для согласования с наблюдаемой диффузностью аномального сигнала ~ 1 мс. Расчет траекторий проводился по модели ионосферы IRI-2001 с коррекцией ионосферных данных по ионограммам наклонного ЛЧМ зондирования на прямой трассе Лейвертон – Ростов-на-Дону. Согласно расчетам, за счет отрицательного градиента электронной концентрации и увеличения высоты максимума F -слоя вдоль трассы распространения имел место рефракционный захват радиоволн на рикошетирующие траектории либо на первом, либо на втором скачке. Для захваченных в ионосферный канал рикошетирующих (волноводных) траекторий проводился расчет ракурсного рассеяния радиоволн на неоднородностях высокоширотной ионосферы и учитывались те траектории,

1) По функциональным возможностям, в отличие от системы SuperDarn, позволяющей решать научные и прикладные задачи, относящиеся к п.3 и частично к п.2 по радиопеленгации, система ЛЧМ ИП позволяет осуществлять радионавигацию и выбор ОРЧ в реальном времени для различных систем связи, что особенно актуально для высокоширотных радиолиний, подверженных воздействию магнитно-ионосферных возмущений.

2) В отличие от системы SuperDarn, работающей в диапазоне 8-20 МГц, предлагается расширить диапазон частот до 60 МГц. Расширение диапазона частот крайне важно для высокоширотных трасс, где имеет место авроральное поглощение, связанное с высыпанием частиц и наблюдается эффект блэкаута КВ во время сильных возмущений. В то же время известно, что высыпания частиц сопровождаются образованием пэтчей в области диффузных полярных сияний с развитой неоднородной структурой и часто образуется интенсивный спорадический слой E. При этом во время возмущений, в период сильного поглощения КВ может проявляться механизм рассеяния радиоволн от неоднородностей и отражения от Es на частотах $\sim 25 \div 30 - 60$ МГц и тогда наличие полной картины распространения радиоволн в диапазоне частот 3 – 60 МГц будет позволять адаптировать радиоэлектронные системы различного назначения к текущей ионосферной обстановке и обеспечивать их работоспособность на полярных трассах в различных геофизических условиях.

3) Важно отметить, что использование системы SuperDARN ориентировано на исследование неоднородностей высокоширотной ионосферы. Известно, что во время магнитной бури наблюдается движение южной границы области с неоднородностями, ответственными за рассеяние, с высоких широт на средние широты. При этом по условиям распространения и геометрии рассеяния неоднородности оказываются вне зоны “видимости” высокоширотных КВ радаров. Это затрудняет детальное исследование динамики мелкомасштабных неоднородностей, локализованных на южной границе аврорального овала на всех стадиях развития магнитной бури с использованием таких радаров. Поэтому для получения полной картины динамики ионосферных

неоднородностей во время магнитной бури необходимо наряду с высокоширотными радарными, использовать КВ радары расположенные на средних широтах. Предлагаемая дислокация ЛЧМ ИП как на высоких, так и на средних широтах, позволяет, наряду со связными задачами, решать указанные выше задачи. Эксперименты, проведенные в последние годы на базе сети ЛЧМ ионозондов, показали перспективность такого подхода для изучения динамики ионосферных неоднородностей и исследования волновых процессов в ионосфере и магнитосфере во время магнитных бурь [3,4].

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

1. *Иванов В.А., Куркин В.И., Носов В.Е., Урядов В.П., Шумаев В.В.* ЛЧМ ионозонд и его применение в ионосферных исследованиях//Изв. Вузов Радиофизика. 2003. т.46, №11.с. 919-952.
2. *Uryadov V.P., Ryabova N.V. et al.* The investigation of long-distance HF propagation on the basis of a chirp sounder // J.Atm. Terr. Phys. 1995, v.57, no. 11, p. 1263-1271.
3. *Урядов В.П., Вертоградов Г.Г., Вертоградов В.Г. и др.* Радарные наблюдения искусственной ионосферной турбулентности во время магнитной бури.//Изв. Вузов Радиофизика. 2004.-т.47, №9.с. 722-738.
4. *Урядов В.П., Куркин В.И., Вертоградов Г.Г. и др.* Особенности распространения КВ сигналов на среднеширотных трассах в условиях геомагнитных возмущений .//Изв. Вузов Радиофизика. 2004. т.47, №12.с. 1041-1056.
5. *Иванов В.А., Рябова Н.В. Урядов В.П., Шумаев В.В.* Аппаратура частотного обеспечения в адаптивной системе КВ радиосвязи //Электросвязь, 1995, №11, с.30-32.
6. *Goodman J.M.* HF Communication, Sciences and Technology. New York, USA. 1992.

7. *Вертоградов Г.Г., Урядов В.П., Вертоградов В.Г., Шевченко В.Н.*
Исследование