

## ЗОНДИРОВАНИЕ ЕСТЕСТВЕННОЙ И ИСКУССТВЕННО-ВОЗМУЩЕННОЙ ИОНОСФЕРЫ С ПОМОЩЬЮ ЛЧМ ИОНОЗОНДА/ПЕЛЕНГАТОРА

В.П.Урядов<sup>1</sup>, Г.Г.Вертоградов<sup>2</sup>, В.Г.Вертоградов<sup>2</sup>, С.В.Кубатко<sup>2</sup>

1 - ФГНУ НИРФИ, г.Нижний Новгород, ул. Б.Печерская, 25/12а, [uryadovvp@nirfi.sci-nnov.ru](mailto:uryadovvp@nirfi.sci-nnov.ru)

2 - ФГОУ ВПО ЮФУ, г.Ростов-на-Дону, ул. Зорге, 5, [vgg@rostel.ru](mailto:vgg@rostel.ru)

*Дано описание работы ионозонда/пеленгатора с использованием сигналов с линейно-частотной модуляцией. Приведены результаты работы ионозонда/пеленгатора на трассе ИЗМИРАН – Ростов-на-Дону в условиях естественной ионосферы и при воздействии на ионосферу мощным декаметровым радиоизлучением нагревного стенда СУРА (Нижегородская область).*

### Введение

При решении задач радиолокации, радионавигации и радиопеленгации возникает проблема местоопределения источника радиоизлучения (рассеяния). Для позиционирования источника радиоизлучения необходимо по результатам измерений характеристик принятого радиосигнала выполнить имитационное моделирование распространения радиоволн с реальным распределением электронной концентрации  $N_e$  на трассе зондирования. Одним из методов определения пространственного распределения электронной концентрации является решение обратной задачи реконструкции профиля  $N_e$  по данным наклонного зондирования, полученным в реальном времени. В связи с возросшими требованиями к характеристикам радиоэлектронного оборудования, функционирующего в условиях горизонтально-неоднородной ионосферы, знания только дистанционно-частотной характеристики (ДЧХ), определяемой с помощью ионозонда, недостаточно для восстановления с приемлемой точностью распределения электронной концентрации  $N_e$  на трассе зондирования. Повышение точности определения пространственно-временного распределения  $N_e$  может быть достигнуто в том случае, когда наряду с ДЧХ измеряется угловая частотная характеристика (УЧХ) трассы. Инструментом, позволяющим измерять полный набор характеристик ионосферного радиоканала (дистанционно-частотные, амплитудно-частотные и угловые частотные характеристики), является разработанный и созданный авторами ЛЧМ ионозонд/пеленгатор.

Ионозонд/пеленгатор с использованием линейно-частотной модуляции (ЛЧМ) сигнала свободен от ошибок пеленгования, обусловленных проблемами многолучевого распространения, которые в классических КВ пеленгаторах, построенных по интерферометрическому принципу, приводят к ошибкам измерения как пеленга (азимута), так и угла места. Ионозонд/пеленгатор благодаря оптимальной обработке широкополосных ЛЧМ сигналов позволяет разделить полностью или частично суммарное интерференционное поле на парциальные лучи по групповой задержке. Как следствие, множество измеренных разностей фаз разделенных парциальных лучей свободны от интерференционных погрешностей.

### Описание работы ЛЧМ ионозонда/пеленгатора. Результаты эксперимента

Будем полагать, что прием осуществляется многоканальным когерентным ЛЧМ приемником на  $N$ -элементную антенную решетку, координаты отдельных элементов –  $\mathbf{r}_n$ ,  $n = 0, 1, \dots, N - 1$ . В этом случае начальная фаза  $j$ -го парциального луча при приеме  $n$ -м антенным элементом может быть представлена в виде

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

где  $\Psi_{0j}$  – 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,  $\lambda$  – длина волны,  $\Delta_j, \alpha_j$  – 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  $\Psi_{0j}$  и выбора начала системы координат, а определяется только углами прихода и ориентацией вектора  $\Delta\mathbf{r}_{nk} = \mathbf{r}_n - \mathbf{r}_k$ :

$$\Delta\Psi_{jnk} = \Psi_{jn} - \Psi_{jk} = \mathbf{k}_j \Delta\mathbf{r}_{nk}. \quad (2)$$

Измеряя множество значений  $\{\Delta\Psi_{jnk}\}$  в пространственно разнесенных антенных элементах, можно определить двухмерные угловые координаты парциальных лучей любым классическим интерферометрическим способом.

Наиболее просто интерферометрический метод определения двухмерных угловых координат (азимут, угол места) источников радиоизлучения реализуется при использовании двухканального когерентного радиоприемного устройства и двухканального АЦП [1]. При этом используется многоэлементная антенная решетка, один из каналов когерентного приемника всегда подсоединен к одному из элементов, который будем называть опорным, а второй канал (предметный) с помощью антенного коммутатора периодически в определенном порядке подключается к каждому из элементов решетки. Когда оба приемника подключены 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 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 РПУ.

С учетом введенных обозначений, фаза ЛЧМ сигнала для  $j$ -го луча на  $n$ -м антенном элементе имеет вид

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

где  $\mathbf{r}_n = \{r_n \cos \alpha_n, r_n \sin \alpha_n\}$  – радиус вектор антенного элемента в плоскости земли. В то же время измеренную фазу сигнала обозначим  $\Phi_{jnl}$ . Как следствие, измеряя неизвестные углы прихода  $j$ -го луча  $\alpha$  и  $\Delta$ , можно синтезировать комплексную нормированную диаграмму направленности

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

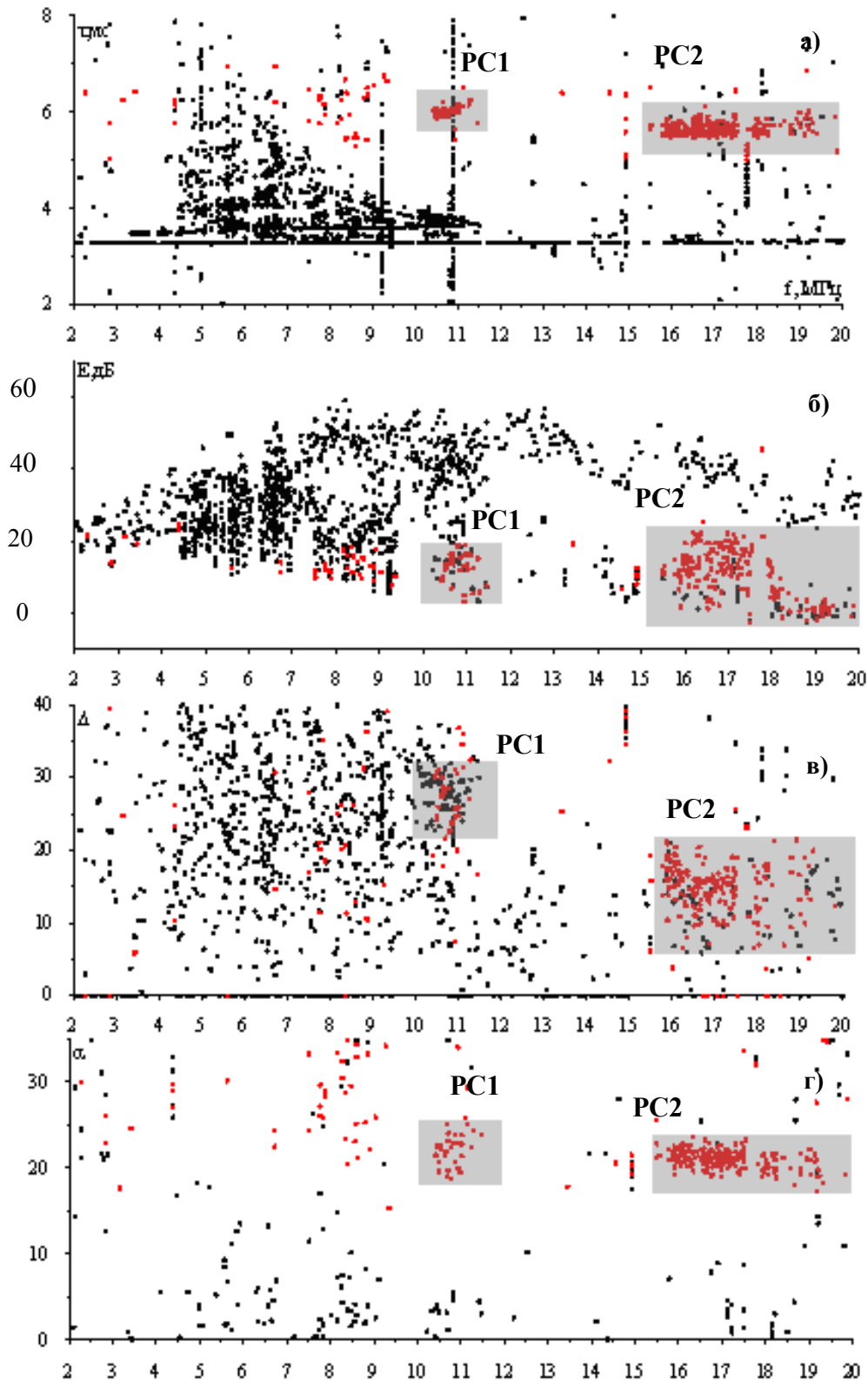
При наведении  $\alpha$  и  $\Delta$  на направление прихода  $j$ -го луча  $\alpha_j$  и  $\Delta_j$  функции  $|D_{jl}(\alpha, \Delta)|$  и  $\text{Re } D_{jl}(\alpha, \Delta)$  одновременно достигают максимального значения, равного 1, а мнимая часть  $\text{Im } D_{jl}(\alpha, \Delta)$  обращается в ноль. Как следствие, алгоритм определения двухмерного направления прихода  $j$ -го луча по измеренным разностям фаз  $\Phi_{jnl}$  на дискретной частоте  $f_l$  сводится к отысканию глобального максимума функций  $|D_{jl}(\alpha, \Delta)|$  или  $\text{Re } D_{jl}(\alpha, \Delta)$ .

Разностный сигнал оцифровывается по промежуточной частоте двухканальным АЦП. Затем осуществляется оценка спектральной плотности мощности (СПМ) сигнала и шума многооконным методом (МТМ-методом), происходит обнаружение лучей, определение их числа  $n$ , комплексных амплитуд  $\alpha_j$ , задержек  $\tau_j$ , коэффициента мутности  $\beta^2$ . По каждой паре выборок разностного сигнала для опорного канала  $\{x_{1k}\}$  и предметного канала  $\{x_{nk}\}$  вычисляются спектры сигналов  $\{s_{1k}\} = FFT(x_{1m})$  и  $\{s_{nk}\} = FFT(x_{nm})$ , где  $k = 1, \dots, M/2$ ,  $FFT$  – оператор дискретного преобразования Фурье, выполняемый на основе алгоритма быстрого преобразования Фурье (БПФ). Спектральная плотность мощности шума определяется гистограммным способом [2]. Для каждого выделенного  $j$ -го луча находится амплитудно-фазовое распределение (АФР) поля по апертуре антенной решетки  $A_{jnl}e^{i\Phi_{jnl}} = a_{jnl}/(a_{jl}K)$ , где  $j = 1, 2, \dots, J$  – номер луча,  $n = 1, 2, \dots, N$  – номер антенного элемента,  $l = 1, 2, \dots, L$  – номер дискретной частоты, на которой будут оцениваться углы прихода. В дальнейшем АФР каждого луча используется для Фурье-синтеза диаграммы направленности и оценки двухмерных угловых координат луча  $\alpha_j$  – азимута прихода в плоскости Земли и  $\Delta_j$  – угла места в вертикальной плоскости. Особенностью двухканального ионозонда/пеленгатора является также то, что при условии измерения УЧХ достигается дополнительная очистка результатов зондирования от шумов естественного происхождения и станционных помех. Как следствие, ДЧХ, полученные в процессе измерения УЧХ, не содержат характерных для одноканальных ЛЧМ зондов следов, порождаемых, прежде всего, влиянием станционных помех.

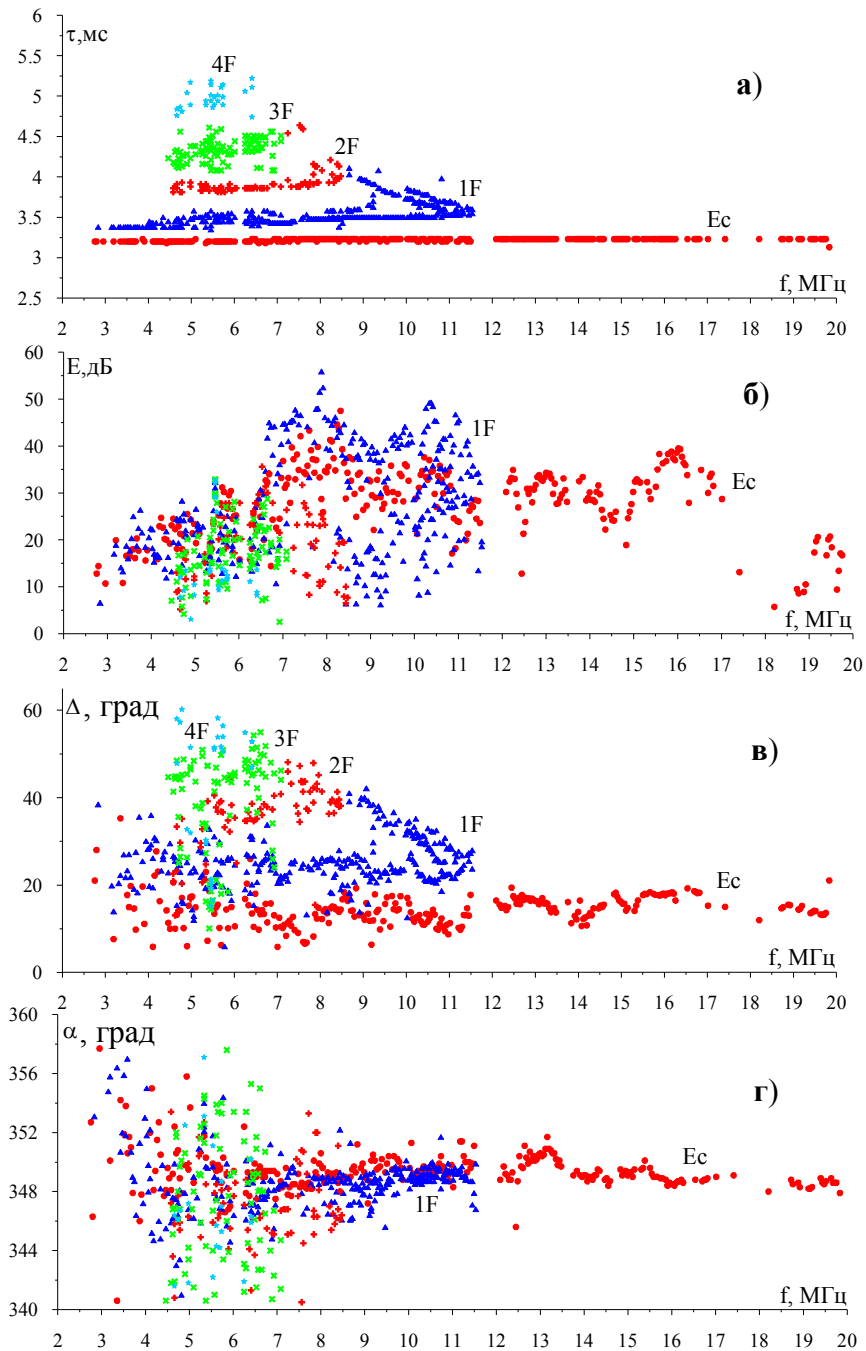
Эксперимент с использованием ЛЧМ ионозонда/пеленгатора для зондирования естественной и искусственно-возмущенной ионосферы проводился с 20 по 22 октября 2008г. с 11:00 – 14:00 UT. Для создания искусственных ионосферных неоднородностей использовался нагревный стенд СУРА (56.1°N, 46.1°E). Три передатчика стенда работали в синфазном режиме на частоте 4.3 МГц с эффективной мощностью ~ 100 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 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. Антенная решетка пеленгатора состояла из 16 вертикальных штыревых антенн высотой 9 м, размещенных на площадке 80x80 м.

Во время работы нагревного стенда СУРА на ионограммах наклонного ЛЧМ зондирования наблюдались сигналы, рассеянные на искусственных мелкомасштабных магнитно-ориентированных неоднородностях в виде треков, задержанных относительно моды прямого сигнала. Пример такой ионограммы показан на рис.1, рассеянные сигналы (РС) отмечены маркерами РС1 и РС2. Согласно расчетам, частотно-угловая селекция рассеянных сигналов обусловлена рефракцией радиоволн [3]. Диффузная рассеянная компонента сигнала на частотах ~ 4-9 МГц соответствуют слабому рассеянному сигналу от искусственных неоднородностей с отражением этого сигнала от Земли на участке трассы СУРА – Ростов-на-Дону. При этом отражение радиоволн от шероховатой поверхности Земли приводит к большим вариациям углов прихода рассеянных сигналов. На рис.2 показана ионограмма во время паузы работы стенда СУРА, когда дополнительные треки отсутствовали и регистрировались характеристики сигналов (ДЧХ, АЧХ и УЧХ) на прямой трассе ИЗМИРАН – Ростов-на-Дону.

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



**Рис.1.** Результаты работы ЛЧМ ионозонда/пеленгатора на трассе ИЗМИРАН – СУРА – Ростов-на-Дону. 20.10.2008г. 15:36 мск. сверху вниз: а – ДЧХ ( $\tau$ , мс), б – АЧХ ( $E$ , дБ), в – угол места ( $\Delta$ , град.), г – азимут ( $\alpha$ , град.), серые прямоугольники (красные точки) – рассеянная компонента.



**Рис.2** Результаты работы ЛЧМ ионозонда/пеленгатора на трассе ИЗМИРАН – Ростов-на-Дону 22 октября 2008г., 14:56 мск: ионограмма (а), амплитудно-частотная характеристика (б), угловая-частотная характеристика ((в) – угол места  $\Delta$ , (г) – азимут  $\alpha$ ) отдельных мод сигнала.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Вертоградов Г.Г., Урядов В.П., Шевченко В.Н., Вертоградов В.Г. Электромагнитные волны и электронные системы. 2007, т.12, №5 с. 25-32.
2. Вертоградов Г.Г., Урядов В.П., Вертоградова Е.Г. Труды XIII международной научно-технической конференции "Радиолокация, Навигация, Связь". Воронеж: САКВОЕЕ, 17-19 апреля 2007, т.2, с.1203-1214.
3. Урядов В.П., Вертоградов Г.Г., Вертоградов В.Г. и др. Изв. Вузов. Радиофизика. 2009, т. 52, №4, с. 267-278.