

## ЛЧМ ИОНОЗОНД/ПЕЛЕНГАТОР В ИОНОСФЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ. РЕЗУЛЬТАТЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

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

1 – Южный федеральный университет, 344090, г. Ростов-на-Дону, ул. Зорге, 5, vgg@bmail

2 – ФГНУ НИРФИ, 603950, г. Нижний Новгород, ул. Б.Печерская, 25/12а, uryadovvp@nirfi.sci-nnov.ru

*Дано краткое описание работы нового инструмента – ЛЧМ ионозонда/пеленгатора, сочетающего преимущества обычного ионозонда и радиопеленгатора. Представлены результаты экспериментальных исследований использования ЛЧМ ионозонда/пеленгатора на трассах различной протяженности, ориентации в естественной ионосфере и в условиях воздействия на ионосферу мощного радиоизлучения. Рассматриваются возможности использования ЛЧМ ионозонда/пеленгатора для обеспечения эффективного функционирования систем радиосвязи, радиопеленгации, радиолокации и радионавигации.*

### 1. Описание аппаратуры

В состав ЛЧМ ионозонда/пеленгатора 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 (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 (предметный канал). В данном эксперименте антенная решетка состояла из 16 вертикальных штыревых антенн высотой 9 м, размещенных на площадке 80x80 м.

При переключении с помощью антенного коммутатора предметный канал периодически подключается к опорной антенне. Как следствие, в этот момент времени каналы двух приемников 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.

С выхода промежуточной частоты двух приемников сигнал поступает на 2-ух каналный аналого-цифровой преобразователь, который предназначен для синхронной оцифровки сигналов с двух приемников.

Обработка оцифрованного разностного сигнала, осуществляется с помощью многопоточного вычислителя, где осуществляется оценка спектральной плотности мощности сигнала и шума многооконным методом, обнаружение лучей, определение их числа  $n$ , комплексных амплитуд  $\alpha_j$ , задержек  $\tau_j$ , коэффициента мутности  $\beta^2$  (отношение мощностей регулярной и флуктуационной составляющих сигнала). Здесь же осуществляется очистка ионограмм, выделение частотных ветвей и формирование зависимостей  $a_j(f)$ ,  $\tau_j(f)$ ,  $(с/ш)_j(f)$ ,  $\beta_j^2(f)$ , определение наименьшей наблюдаемой частоты (ННЧ) и максимальной наблюдаемой частоты (МНЧ), интервалов многолучевости, интервала временного рассеяния  $\Delta t$ , среднеквадратичного отклонения отношения (с/ш)  $\sigma_{с/ш}$ , вероятности ошибки, надежности

связи [1]. С помощью многопоточного вычислителя осуществляется измерение двухмерных угловых координат каждого  $j$ -го луча путем Фурье-синтеза диаграммы направленности антенны и окончательная очистка ионограмм на основе критерия достоверности оценки углов прихода.

## **2. Результаты экспериментальных исследований**

Эксперименты с использованием ЛЧМ ионозонда/пеленгатора проводятся с 2006г. на трассах различной протяженности, ориентации, в условиях естественной и искусственно-возмущенной ионосферы [2-4].

### **2.1. Трасса Кипр – Ростов-на-Дону**

На трассе Кипр – Ростов-на-Дону в дневные и вечерние часы суток на ионограммах НЗ достаточно часто наблюдаются в широкой полосе частот следы мощного рассеянного сигнала типа сигнала возвратно-наклонного зондирования (ВНЗ) с задержками, превышающими задержки моды 2F [2]. Измерения угловых частотных характеристик (УЧХ) позволили оценить азимут прихода рассеянного сигнала, позиционировать следы рассеянных мод из одного приемного пункта, не привлекая разностно-дальномерный метод, проследить изменения азимута от частоты и объяснить их природу рассеянием радиоволн при отражении от поверхности Земли. Согласно полученным данным, на поверхности Земли существует несколько характерных областей рассеяния. Одна имеет азимут  $160^\circ$ - $170^\circ$ , вторая –  $140^\circ$ - $150^\circ$ , третья –  $130^\circ$ - $135^\circ$ . 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  $170^\circ$  до  $130^\circ$ . 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  $170^\circ$  до  $150^\circ$ , а групповая задержка возрастает от 7 мс до 9 мс. Подобные явления могут быть объяснены рассеянием ЛЧМ-сигналов, излучаемых из Кипра, от гор Малого Кавказа (азимут из Ростова-на-Дону  $170^\circ$ - $160^\circ$ , задержка  $\sim 7$  мс), горных массивов Иранского нагорья: массива Загрос (азимут  $150^\circ$ - $140^\circ$ , задержка 8-10 мс), гор Эльбурс (азимут  $135^\circ$ - $130^\circ$ , задержка  $\sim 10$ -11 мс) в направлении на Ростов-на-Дону, т.е. в приемном пункте Ростове-на-Дону принимаются сигналы типа сигналов ВНЗ, рассеянные горными массивами Иранского нагорья и Кавказа.

### **2.2. Трасса ИЗМИРАН – Ростов-на-Дону**

На трассе ИЗМИРАН – Ростов-на-Дону в период с 20 по 22 октября 2008г. с 11:00 до 14:00 UT проводился эксперимент с использованием ЛЧМ ионозонда/пеленгатора для зондирования искусственной ионосферной турбулентности. Для создания искусственных ионосферных неоднородностей использовался нагревный стенд СУРА ( $56.1^\circ\text{N}$ ,  $46.1^\circ\text{E}$ ). Три передатчика стенда работали в синфазном режиме на частоте 4.3 МГц с эффективной мощностью  $\sim 70$  МВт. Наклон диаграммы антенны составлял  $12^\circ$  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 ( $55.28^\circ\text{N}$ ,  $37.22^\circ\text{E}$ ) – СУРА – Ростов-на-Дону ( $47.24^\circ\text{N}$ ,  $39.64^\circ\text{E}$ ). ЛЧМ передатчик работал в диапазоне частот 2-20 МГц, скорость перестройки частоты  $\mu_0$  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. Во время работы стенда СУРА, наряду с прямым сигналом, принимались сигналы, рассеянные искусственными мелкомасштабными магнитно-ориентированными неоднородностями [3]. В зависимости от ионосферных условий, регистрировалось до трех рассеянных сигналов (РС). Слабому сигналу РС1 (частоты 6-9.5 МГц) с большой дисперсией углов прихода соответствовали вертикальные углы прихода  $\Delta$  в интервале  $\sim 20$ - $35^\circ$ , сигналу РС2 (частоты 10-12 МГц) – 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 ( $21.6^\circ$ ). Азимутальные углы прихода сигнала РС1 имеют значительно большую дисперсию и лежат в интервале  $\alpha \sim 20-35^\circ$ .

Моделирование показало, что частотные диапазоны и форма рассеянных сигналов сильно зависят от ионосферных условий, радиуса и толщины рассеивающей области. Небольшие изменения в высоте максимума и критической частоте  $F$ - слоя приводят к сильному изменению вида рассеянного сигнала, что связано с большой ролью рефракции в обеспечении ракурсных условий рассеяния.

### 2.3. Трасса Лейвертон (Австралия) – Ростов-на-Дону

Эксперимент по сверхдальному зондированию ионосферного канала проводился с 5 декабря 2009г. по 12 января 2010г. В качестве передатчика ЛЧМ-сигналов использовалась станция, расположенная в Лейвертон ( $28,628^\circ\text{S}$ ,  $122,403^\circ\text{E}$ ), 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, амплитудно-частотные и угловые частотные характеристики). Протяженность трансэкваториальной трассы Лейвертон (Австралия) – Ростов-на-Дону составляет 11790 км, азимут из приемного пункта на передающий пункт составляет  $115^\circ$ .

На данной трассе, наряду с прямым сигналом, распространяющимся по дуге большого круга между передатчиком и приемником, регистрировались аномальные сигналы с большей задержкой, чем задержка прямого сигнала [4]. Интенсивный аномальный сигнал на частотах  $\sim 5 - 7$  МГц регистрировался с азимутом угла прихода  $\alpha \approx 20^\circ$  и задержкой  $\sim 11-12$  мс относительно прямого сигнала. Этот сигнал наблюдался в основном в вечернее время с наибольшей появляемостью в 20:00 – 24:00 мск. Амплитуда аномального сигнала с большой задержкой была сопоставима с амплитудой прямого сигнала, их отличие составляет величину  $\sim 5-10$  дБ.

Исходя из геометрии трансэкваториальной трассы и результатов измерений ДЧХ, АЧХ и УЧХ прямого и аномального (бокового) сигнала, мы полагаем, что аномальный сигнал с большой задержкой  $\sim 11-12$  мс и азимутом угла прихода  $\alpha \approx 20^\circ$ , обусловлен рассеянием радиоволн от неоднородностей высокоширотной ионосферы северного полушария.

Для подтверждения сделанных предположений о природе аномального сигнала мы провели моделирование распространения радиоволн. Расположение области рассеяния в ионосфере, ответственной за появление аномального (бокового) сигнала, мы выбирали на основе результатов измерений времени прихода и азимутального угла прихода аномального сигнала 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  $71^\circ\text{N}$ ,  $68,5^\circ\text{E}$  (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 ионизации [5], характеризуемого наличием в вечерние и ночные часы местного времени интенсивных мелкомасштабных неоднородностей электронной концентрации, ответственных за обратное рассеяние коротковолновых сигналов [6].

Проводился расчет траекторий для частот от 5 до 15 МГц для углов излучения от  $0^\circ$  до угла выхода луча из ионосферы 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. 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 Лейвертон – область рассеяния имел место рефракционный захват радиоволн на рикошетирующие траектории либо на первом, либо на втором скачке. 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 (ОР) – Ростов-на-Дону, учитывая, что из-за большого расстояния от области рассеяния до приемного пункта  $\sim 3000$  км для попадания в приемный пункт рассеянный сигнал должен отразиться от Земли и ионосферы.

### **3. Восстановление распределения электронной концентрации по данным ЛЧМ ионозонда/пеленгатора**

Для решения задач радионавигации, радиопеленгации, радиолокации и прогнозирования работы систем радиосвязи в КВ диапазоне необходимо знать пространственное распределение электронной концентрации и учитывать ее временные вариации. Для определения пространственного распределения электронной концентрации  $N_e$  вдоль трассы распространения дуга большого круга, соединяющего пункты передачи и приема, разбивается на  $M$  горизонтальных однородных участков. Распределение  $N_e$  на каждом из участков задается многослойной квазипараболической моделью, а ее параметры (критические частоты слоев  $f_m$ , высоты максимумов слоев  $h_m$  и полутолщины слоев  $y_m$ ) корректируются по результатам наклонного ЛЧМ зондирования. Задача сводится к параметрическому заданию пространственного распределения  $N_e$  и к определению этих параметров на всех  $M$  участках. В качестве начального приближения выбираются параметры ионосферных слоев, прогнозируемые с помощью ионосферной модели IRI-2007. Измеренные при работе ЛЧМ ионозонда/пеленгатора дистанционно-частотные (ДЧХ) и угловые частотные (УЧХ) характеристики автоматически оцифровываются на наборе частот. На этом же наборе частот рассчитываются теоретические групповые задержки и теоретические углы прихода сигнала, которые являются функциями параметров слоев  $E$ ,  $F1$  и  $F2$  ионосферной модели. Далее рассчитывается среднеквадратическое отклонение (СКО) измеренных групповых задержек и углов прихода от рассчитанных. В результате задача сводится к глобальной минимизации СКО по параметрам  $f_m$ ,  $h_m$  и  $y_m$  горизонтально неоднородной ионосферы.

Экспериментальная апробация разработанного алгоритма была проведена на трассе Кипр – Ростов-на-Дону в феврале 2009г. Показано, что при учете измерений углов прихода сигнала уточняются в первую очередь полутолщина и высота максимума слоя  $F2$ . Критическая частота  $F2$ - слоя довольно точно определяется по ДЧХ. Показано, что критическая частота в середине трассы определяется с точностью  $\sim 0,08$  МГц, а высота максимума – с точностью  $\sim 10$  км.

### **4. Предложения по использованию ЛЧМ ионозонда/пеленгатора для решения практических задач ионосферного распространения радиоволн**

Для мониторинга ионосферного канала и обеспечения адаптации систем радиосвязи, радиопеленгации, радионавигации и радиолокации к текущей ионосферной обстановке предлагается развернуть сеть ЛЧМ ионозондов/пеленгаторов, которые позволяют в реальном времени одновременно измерять ключевые характеристики ионосферного канала (дистанционно-частотные, амплитудно-частотные и угловые частотные характеристики (азимут и угол места)) во всем коротковолновом диапазоне.

При этом по результатам зондирования по опорному каналу определяются оптимальные рабочие систем связи, вероятность ошибки, надежность связи и ряд других характеристик.

При работе в режиме ионозонда/пеленгатора пеленгуются объекты наземного, морского и воздушного базирования, оснащенные маломощными ЛЧМ передатчиками, что особенно важно в высокоширотных районах, характеризующихся магнитно-ионосферными возмущениями и аномальными модами распространения.

По результатам работы ЛЧМ ионозонда/пеленгатора путем измерения ДЧХ, АЧХ и УЧХ реперных ЛЧМ передатчиков восстанавливается профиль электронной концентрации вдоль трассы распространения и эти данные могут быть использованы при работе загоризонтных КВ радаров.

**Предлагается следующая дислокация ЛЧМ ионозондов/пеленгаторов:**

Северный эшелон станций: Мурманск, Диксон, Тикси, Певек Среднеширотный эшелон станций: Калининград, Ростов-на-Дону, Серов (Свердловская обл.) Томск, Киренск (Иркутская обл.), Охотск (Хабаровский край). Отметим, что расположение пунктов может несколько варьироваться, исходя из удобства доставки оборудования, монтажа и обслуживания станций. В каждом из 10 пунктов должны быть размещены ЛЧМ передатчик и ЛЧМ приемник/пеленгатор. Диапазон частот 2 – 60 МГц, мощность передатчика 100 – 1000 Вт.

**Область применения предлагаемой многофункциональной системы:**

1. Наземная, морская и авиационная радиосвязь, включая связь в высоких широтах.
2. Радиопеленгация и радионавигация авиационных и морских судов.
3. Радарные исследования структуры и динамики высокоширотной ионосферы.

Собственно говоря, предлагается Российский аналог системы SuperDARN с некоторыми важными особенностями:

1) В отличие от системы SuperDARN, позволяющей решать научные и прикладные задачи, относящиеся только к п.3 и частично к п.2 по радиопеленгации, предлагаемая система ЛЧМ ионозондов/пеленгаторов позволяет осуществлять выбор оптимальных рабочих частот (ОРЧ) в реальном времени для различных систем связи (по опорному каналу) и проводить радионавигацию, 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 где наблюдается эффект блэкаута коротких волн во время сильных возмущений.

3) Важно еще 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. Поэтому для получения полной картины динамики ионосферных неоднородностей во время магнитной бури необходимо наряду с высокоширотными радарными, использовать КВ радары расположенные на средних широтах.

В заключение заметим, что 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, грант № 09-02-00109.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Вертоградов Г.Г., Урядов В.П., Вертоградова Е.Г. // Труды XIII Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь» Воронеж. 2007, т.2, с.1203.
2. Вертоградов Г.Г., Урядов В.П., Шевченко В.Н., Вертоградов В.Г. // Электромагнитные волны и электронные системы. 2007, т.12, №5 с. 25.
3. Урядов В.П., Вертоградов Г.Г., Вертоградов В.Г. и др. // Изв. Вузов. Радиофизика. 2009, т.52, №4, с.267.
4. Вертоградов Г.Г., Урядов В.П., Вертоградова Е.Г., Понятов А.А. // Изв. Вузов. Радиофизика. 2010, т.53, №3, с. 176.
5. Moffett R.J., Quegan S. J. // Atm. Terr. Phys. 1983, v.45, p. 315.
6. Moller H.G. // J. Atm. Terr. Phys. 1974, v.36, p. 1487.