

## 12. АЛГОРИТМЫ И МЕТОДЫ ОЦЕНКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ЛЧМ - ЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ

Грозов В.П., Ильин Н.В., Котович Г.В., Пономарчук С.Н.  
Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск

*Аннотация.* В работе рассмотрены методы и алгоритмы вторичной обработки и интерпретации радиофизической информации, получаемой на базе ЛЧМ ионозонда Института солнечно-земной физики СО РАН, работающего в режимах вертикального и наклонного зондирования ионосферы (ВЗ и НЗ). В рамках данной проблемы рассмотрены следующие задачи: а) проведение предобработки для удаления шума с изображения и улучшения амплитудных характеристик; б) сжатие данных с использованием клеточного автомата; в) интерпретация ионограмм ВЗ и НЗ. Методы интерпретации ионограмм основаны на использовании результатов моделирования частотных зависимостей характеристик распространения в режиме долгосрочного прогноза и результатов обработки экспериментальных данных. На основе разработанных методов созданы алгоритмы прямой диагностики декаметрового радиоканала по данным ВЗ и НЗ, на основе которых проводится оперативный выбор рабочих частот связного радиоканала.

### ВВЕДЕНИЕ

Ионосферные линии связи являются составной частью радиотехнических систем передачи информации, использующих для своей работы радиоволны декаметрового диапазона (10-100м). Ионосферная плазма, как среда распространения радиоволн, характеризуется неоднородностями различных масштабов, дисперсией, поглощением, анизотропией и, при определенных условиях, нелинейностью. Неоднородные электрические свойства земной поверхности, ее сложный рельеф и покров также сильно влияют на свойства радиоволн. Для различных длин волн и видов радиотрасс эти свойства среды проявляются в виде разнообразных эффектов, которые во многих случаях действуют в комплексе и формируют сложные особенности процесса распространения радиосигналов. Современным системам передачи информации приходится также работать в условиях весьма большого многообразия помех, нередко в условиях недостаточной априорной информации о них. В связи с этим большой интерес представляет построение адаптивных систем, которые могут обеспечить максимально эффективное обнаружение или различие сигналов в шуме с произвольным законом распределения.

Применительно к декаметровым радиоканалам адаптация сводится к рациональному выбору рабочих частот, применимых по условиям распространения радиоволн и обеспечивающих необходимое превышение уровней сигнал/помеха. Реализация такого рода адаптации возможна по данным зондирования ионосферы с

использованием ЛЧМ – ионозондов на основе методов и алгоритмов вторичной обработки ионограмм, методов оперативного определения модового состава и максимальных применимых частот (МПЧ) каждого мода, построения дистанционно – частотных характеристик (ДЧХ) по значимым точкам амплитудного рельефа сигнала, идентификации модов распространения. Достоверность результатов зависит от точности регистрации ионограмм, наличия привязки диагностического комплекса к системе единого времени и точностных характеристик методов прогнозирования. Рабочие частоты декаметровой радиосвязи необходимо выбирать в зависимости от условий распространения сигналов по радиолинии и помеховой обстановки в пункте приема. Это требует решения задач панорамного измерения уровня помех в заданном диапазоне частот, определения отношения сигнал/шум в зависимости от ширины полосы приема, определения интервалов временного и частотного рассеяния, выбора критериев расчета диапазонов оптимальных рабочих частот по условиям распространения сигнала и помеховой обстановки.

### МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ВТОРИЧНОЙ ОБРАБОТКИ ИОНОГРАММ

Исходными данными для рассматриваемых ниже методов являются результаты вторичной обработки ионограмм ВЗ и НЗ, полученных на ЛЧМ–ионозонде. Выделим основные моменты вторичной обработки. По результатам спектрального анализа разностного сигнала на выходе приемника формируется ионограмма – зависимость группового времени распространения сигнала от частоты. На ионограмме можно выделить три основных типа объектов: полезный сигнал, фоновый шум (основной фон) и сосредоточенные помехи (вертикальные линии), одиночные выбросы.

Вторичная обработка ионограмм сводится к решению двух самостоятельных задач:

- а) проведению предобработки ионограмм для удаления шума с изображения и улучшения амплитудных характеристик;
- б) сжатию данных, позволяющих провести существенное сокращение их объема без существенной потери полезной информации.

Предобработка ионограмм заключается в ее очистке от шумовых составляющих [1], т.е. необходимо выделить полезный сигнал на фоне шума и стационарных помех, а также удалить одиночные выбросы, которые имеют интенсивность, сравнимую с полезным сигналом и могут приводить к сбоям в работе алгоритмов определения

параметров ионосферы. Важную роль в исключении шума играют различные методы сглаживания и фильтрации. Используемые методы сглаживания можно разделить на глобальные и локальные. Сложность использования глобальных методов фильтрации определяется:

- необходимостью знания априорной информации о статистических характеристиках неискаженного изображения и шума и вычислительной трудоемкостью процедур фильтрации;
- сглаживанием как шума, так и полезного сигнала, особенно в высокочастотной области спектра пространственных частот (мелкие детали, границы перехода и т.д.);

Локальные методы сглаживания позволяют сформировать оценки поля не зашумленного изображения путем анализа и обработки ограниченных и достаточно малых по размерам фрагментов. Для них характерна вычислительная эффективность и возможность обработки изображений в реальном масштабе времени за счет упрощения процедур сглаживания.

Среди локальных методов сглаживания можно выделить несколько групп фильтров:

- усредняющие (процедуры строятся на основе вычисления среднего значения амплитуды отсчетов локальной области изображения, окружающей центральный отсчет);
- аддитивные фильтры (процедуры строятся на основе формирования локальных статистик, значения которых связаны с характеристиками обрабатываемого фрагмента).

Анализ фильтров, используемых при обработке ионограмм, показал, что для удаления шума на изображении и восстановления отсчетов сигнала на этапе предобработки можно использовать локальные фильтры, построенных на порядковых и аддитивных статистиках, значения которых связаны с характеристиками обрабатываемого фрагмента, а именно:

- фильтрация методом усреднения по наиболее однородной области;
- медианный фильтр.

При фильтрация методом усреднения по наиболее однородной области в пределах окна (например, 5x5 точек) выбираются окна меньшего размера (девять окон 3x3), для каждого из которых вычисляется среднее значение и дисперсия. В результате

центральному элементу исходного большого окна присваивается среднее значение одного из девяти окон, которое имеет наименьшую дисперсию, т.е. наиболее однородную структуру. Такой фильтр хорошо работает при сглаживании неоднородностей, однако не отличается вычислительной эффективностью, что связано с необходимостью вычисления моментов локальных дисперсий, а также такой метод может приводить к порождению ложных структур [2].

Медианный фильтр позволяет сглаживать помехи и уменьшать размытие границ треков и также восстанавливать значения в разрывах треков. Их статистические свойства хорошо изучены, предложены быстрые вычислительные алгоритмы. Для их реализации не нужна априорная информация типа предопределяемых пороговых значений. Их достоинствами являются достаточно высокое быстродействие и свобода в выборе формы анализируемой окрестности.

Методика сжатия данных применяется для выделения точек с значимой амплитудой, физически соответствующих величинам – моментам прихода сигнала по переднему фронту сигнала или максимуму амплитудного рельефа. Для отсева одиночных артефактов, частичного восстановления данных и выявления первичного трека на ионограмме эффективен механизм клеточного автомата. Клеточные автоматы – это дискретные динамические системы, поведение которых полностью определяется локальными взаимными связями элементов этих систем. Все пространство данных делится на элементарные ячейки, которые затем эволюционируют при дискретно идущем времени. Закон динамики такой системы выражается некоторым набором правил, по которым каждая клетка изменяет свое состояние в зависимости от состояния соседних, входящих в некоторую локальную область.

С учетом специфики задачи используется следующая логика клеточного автомата.

Каждая клетка характеризуется:

- своим местоположением в пространстве измерений частота – задержка;
- размерами области, в которой располагаются клетки-соседи;
- суммарной амплитудой отсчетов, попадающих в эту область;
- способностью двигаться по заданной полосе частот вдоль всего интервала задержек.

Приняты следующие правила эволюции.

## Зондирование земных покровов радарми с синтезированной апертурой

1) Клетка рождается в центре области, если число отсчетов, попадающих в область, и их суммарная амплитуда больше критических значений.

2) Клетка двигается по фиксированной полосе частот, пока идет возрастание суммарной амплитуды в области.

3) Клетка останавливается, если прекращается рост амплитуды, и фиксирует свое положение в месте максимальной амплитуды.

4) При спадании амплитуды до некоторого критического значения (относительно только что достигнутого максимума) происходит рождение нового объекта и вся процедура повторяется. В результате остаются точки на гребнях треков и незначительная часть шума.

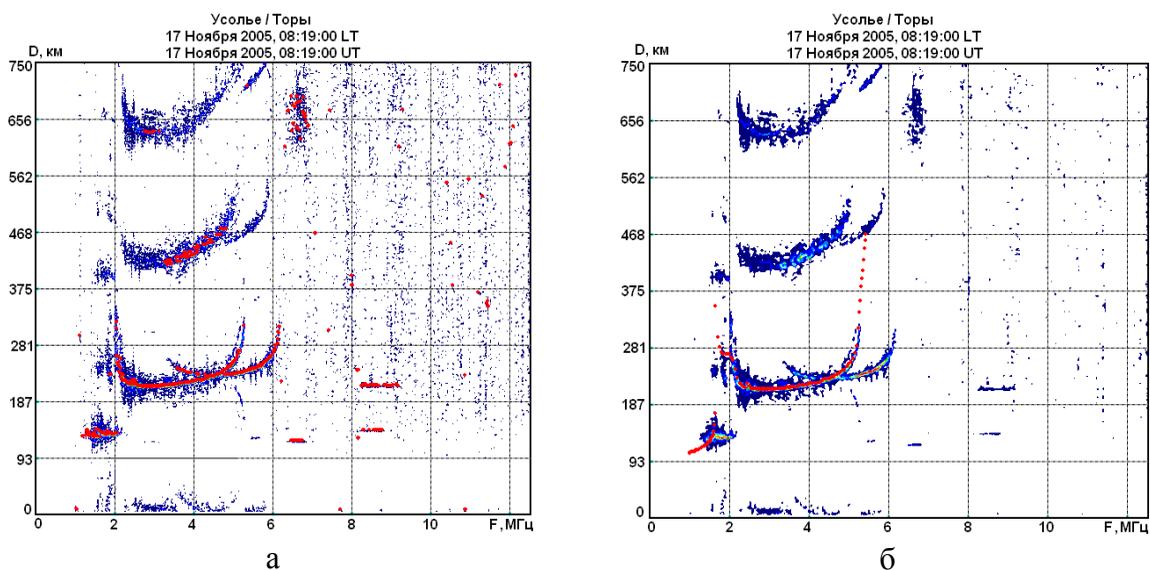
Реализованный алгоритм позволил достигнуть сжатия исходной информации до 5-10 раз в зависимости от уровня шума и диффузности [3].

### МЕТОДИКА ИНТЕРПРЕТАЦИИ ИОНОГРАММ

Методика интерпретации ионограмм ВЗ основана на использовании результатов моделирования высотно-частотной характеристики (ВЧХ) в режиме долгосрочного прогноза (ДП) и результатов обработки экспериментальных ионограмм. В результате вторичной обработки получено изображение в виде "облаков" точек со значимой амплитудой в координатах: действующая высота - рабочая частота, т.е. имеется матрица экспериментальных точек, соответствующая двумерному массиву значений действующей высоты на сетке частот. Используя модели ионосферы, например, IRI как стандартный вариант модели ионосферы [4] или полуэмпирическую модель ПЭМИ [5], рассчитывается высотно-частотная характеристика вертикального распространения (ВЧХ) или ионограмма, показывающая изменение действующей высоты отражения как функцию частоты. При моделировании такой зависимости находится решение для интеграла на основе общих формул. Эта задача относится к классу прямых задач и ее решение не составляет большой трудности. Алгоритм, используемый для перевода истинных высот в действующие высоты, изложен в работе [6].

Полученная ВЧХ для обыкновенной компоненты поля накладывается на экспериментальную ионограмму и используется для построения модельной маски. Далее, путем сканирования модельной маски по ионограмме, строится гистограмма совпадений модельных и реальных треков. Затем меняется наклон модельных треков и

процесс сканирования повторяется. После завершения процесса, выбирается гистограмма с максимальным значением точек со значимой амплитудой, попадающих в модельную маску. Исходя из положения модельной маски по непрерывности строится трек для обыкновенной компоненты для слоя F. Трек для слоя E берется из результатов расчетов ВЧХ по модели ионосферы. На рис. 1 показаны результаты автоматической интерпретации ионограммы ВЗ: исходная ионограмма с результатами вторичной обработки (а) и результат интерпретации (б).



*Рис.1. Ионограмма вертикального зондирования и результаты интерпретации, 17 ноября 2005 г., 14:15 UT*

При наличии сложных геофизических условий – возмущения, помехи, многослойность ионосферы возрастает погрешность интерпретации ионограмм, поэтому в этих случаях можно использовать режим полуавтоматической идентификации ионограмм. Исходными также являются выделенные точки моментов приходов сигналов.

### МЕТОДИКА ИНТЕРПРЕТАЦИИ ИОНОГРАММ НЗ

Методика основана на использовании результатов моделирования ДЧХ на заданной трассе в режиме долгосрочного прогноза, адиабатических соотношений и результатах обработки экспериментальных ионограмм: матрице точек со значимой амплитудой  $A(f_i, P_j)$ .

Для задачи интерпретации ионограмм НЗ можно сформулировать следующие основополагающие предположения [7]. При вариациях параметров ионосферы в пределах погрешности долгосрочного прогноза сохраняются:

## Зондирование земных покровов радарми с синтезированной апертурой

- отношение группового пути  $P_m$  в точке смыкания нижнего и верхнего лучей какого-либо мода к длине трассы;
- отношение МПЧ модов ( $\chi$ ) различных кратностей, распространяющихся в одном из волноводных каналов (нижней стенкой их является поверхность Земли, а верхней слой E, F1 или F2);
- ДЧХ одного мода, кратности  $l$ , на относительной сетке частот  $\beta = f / f_{m,l}$ , где  $f_{m,l}$  - МПЧ мода для рассматриваемой дальности.

Алгоритм интерпретации ионограмм НЗ в автоматическом режиме строится следующим образом. Проводятся расчеты ДЧХ НЗ для данной трассы в режиме долгосрочного прогноза. Исходя из этого, строится модельная маска для мода минимальной кратности слоя F (кратность  $l_0$ ), включающая в себя две полосы шириной  $\Delta P$  км (по вертикали) и протяженностью по частоте от  $\mu f_m^p$  до  $f_m^p$ , где  $f_m^p$  – прогнозная МПЧ опорного мода, для нижнего луча, и протяженностью от  $\nu f_m^p$  до  $f_m^p$  – для верхнего луча. Ширину полосы  $\Delta P$  и параметры  $\mu, \nu$  можно варьировать, исходя из разрешения ионозонда по дальности и частоте.

Алгоритм идентификации опорного следа на ионограмме заключается в подсчете числа точек моментов прихода сигналов из матрицы  $A(f_i, P_j)$  при движении модельной маски по ионограмме по экспериментальным точкам со значимой амплитудой на относительной сетке частот. Маска движется по точкам матрицы  $A(f_i, P_j)$ , путем совмещения "носика" с точкой  $A_{ij}$ . При передвижении маски подсчитывается число точек  $A(f_i, P_j)$ , попадающих в маску в пределах прямоугольника  $[\Delta f \times \Delta P]$ , где  $\Delta f$  и  $\Delta P$  подбираются, исходя из разрешимости ионозонда по дальности и частоте. Максимальное значение количества экспериментальных точек  $n_i$ , а также соответствующее этому положению маски значение группового пути для точки смыкания верхнего и нижнего лучей запоминаются. Таким образом определяются реальная максимальная применимая частота  $f_m^r$  и соответствующий минимальный групповой путь  $P_m^r$ .

Если максимальное число точек, попадающих в маску, меньше некоторого числа, считается, что мод кратности  $l_0$  не идентифицирован, и процедура повторяется

для мода кратности  $l_0 + 1$ . Переход на мод кратности  $l_0 + 1$  необходимо также сделать в случае, если опорный мод выходит за правый край ионограммы. Поэтому, предварительно перед идентификацией опорного мода, требуется “просканировать” правый край ионограммы прямоугольной маской, с размерами по горизонтали порядка 1000 КГц и по вертикали –  $\Delta P$ .

В случае определения  $f_m^r$  и  $P_m^r$  оставшиеся экспериментальные точки, соответствующие моду кратности  $l_0$ , идентифицируются путем удлинения полос маски в область низких частот вдоль модельной ДЧХ, масштабированной множителем  $f_m^r / f_m^p$ , и поиском элементов  $P_{ij}$ , попадающих в эти полосы. Далее проводится линейная интерполяция треков для перехода на равномерную сетку частот.

По вышеописанной процедуре проводится идентификация модов большей кратности  $l > l_0$ . В условиях возмущений и большой помехозащумленности ионограмм необходимо использовать режим полуавтоматической интерпретации модов распространения. Также необходимо отметить, что в автоматическом режиме проводится интерпретация и построение треков для модов распространения для слоя F2. Идентификация отражений от E слоя и межслоевых отражений не проводится – используются модельные треки.

На рис. 2 показаны результаты автоматической интерпретации ионограммы НЗ: исходная ионограмма с результатами вторичной обработки (а) и результат идентификации модов распространения (б).

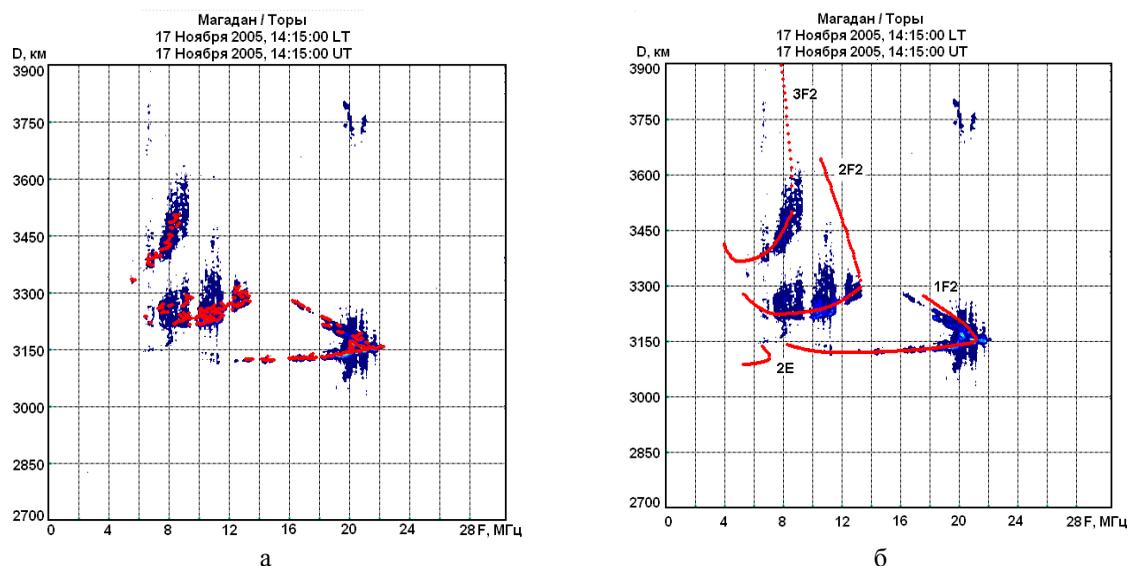


Рис.2. Ионограмма наклонного зондирования и результаты интерпретации, 17 ноября 2005 г., 14:15 UT

## ПРЯМАЯ ДИАГНОСТИКА РАДИОКАНАЛА ПО ДАННЫМ ВЗ И НЗ

При обслуживании региональных систем декаметровый радиосвязи, когда длина радиотрассы не превышает предельной дальности одного скачка (~3000 км), расчет оптимальных рабочих частот в реальном времени возможен на использовании в качестве диагностической характеристики результатов вертикального зондирования. В рамках метода Смита - Казанцева проводится прямой пересчет высотно-частотной характеристики (ВЧХ) в средней точке радиотрассы в дистанционно-частотную характеристику (ДЧХ) наклонного зондирования. Так как радиус пространственной корреляции ионосферных параметров составляет порядка 1000 км, в первом приближении на трассах, длина которых меньше удвоенного радиуса корреляции, можно перенести ВЧХ, измеренной в пункте зондирования, в среднюю точку трассы. Такое предположение соответствует сферически-симметричной модели ионосферы и выполняется для спокойных условий состояния среды в отсутствии резких градиентов и возмущений.

Алгоритм расчета характеристик радиосигналов в реальном времени по текущим данным вертикального зондирования осуществляется по следующей схеме. Проводится автоматическая обработка ионограммы ВЗ с целью выделения сигналов со значимой амплитудой. Далее отсекаются отраженные сигналы, кратности больше 1, проводится идентификация следов и строятся треки. После выделения треков производится отсчет ионосферных параметров: критических частот и минимальных высот отражения для каждого ионосферного слоя. В случае правильной идентификации всех слоев ВЧХ по трекам рассчитываются характеристики наклонного распространения: дистанционно-частотная характеристика, максимальные применимые частоты (МПЧ) модов распространения и уровень сигнала на входе приемника.

По текущим данным станции НЗ, работающей в диапазоне частот, после вторичной обработки имеется набор треков, характеризующих разные моды, относящиеся к разным областям отражения. По выделенным трекам ДЧХ НЗ максимальная наблюдаемая частота каждого выделенного трека есть не что иное как максимальная частота в этом треке. Каждый выделенный трек соответствует определенному моду распространения сигнала. Соответственно, минимальная наблюдаемая частота (ННЧ) – это начало трека.

В случае, когда в качестве диагностической характеристики используется текущие МПЧ модов для трассы наклонного зондирования, которая не совпадает с интересующей радиотрассой, в основе алгоритма восстановления ДЧХ НЗ лежит слабая зависимость отношения двух МПЧ для различных дальностей при изменении параметров ионосферы. По известной МПЧ для одной из дальностей можно рассчитать МПЧ соответствующего мода для другой. Данная методика может быть использована для оперативной диагностики радиоканала в различных направлениях в случае, когда задействована одна диагностическая трасса. При этом, для обеспечения достаточной точности восстановления ДЧХ НЗ необходимо, чтобы возмущение охватывало все интересующие радиотрассы.

Постановка задачи следующая. Имеются две трассы:

- диагностическая трасса, на которой проводится НЗ и определяются МПЧ модов распространения;
- интересующая трасса, на которую делается оперативный прогноз МПЧ модов распространения по данным на диагностической трассе.

Для оперативного прогноза МПЧ на интересующей трассе используются экспериментальные данные, полученные на диагностической трассе и результаты моделирования по долгосрочному прогнозу. Используется адиабатическое соотношение, которые слабо меняются, при изменениях параметров ионосферы: отношение МПЧ модов различных радиотрасс. Для диагностической трассы данные

соотношения имеют вид:  $\frac{f_{1-1}^{реальн}}{f_{1-2}^{реальн}} = \Gamma_1^{реальн}$  для экспериментальных значений МПЧ мода

первой кратности,  $\frac{f_{1-1}^{прог}}{f_{1-2}^{прог}} = \Gamma_1^{прог}$  - для прогнозных значений МПЧ. Аналогично этим

соотношениям будут выглядеть формулы для МПЧ модов второй кратности:

$\frac{f_{2-1}^{реальн}}{f_{2-2}^{реальн}} = \Gamma_2^{реальн}$ ,  $\frac{f_{2-1}^{прог}}{f_{2-2}^{прог}} = \Gamma_2^{прог}$ . Первый нижний индекс означает кратность мода, второй

индекс – номер трассы (1 – диагностическая, 2 – интересующая). Исходя из адиабатичности значения  $\Gamma$  получим формулы пересчета с одной трассы на другую:

$f_{1-2}^{реальн} = f_{1-1}^{реальн} \cdot \frac{f_{1-2}^{прог}}{f_{1-1}^{прог}}$  для МПЧ первого мода и  $f_{2-2}^{реальн} = f_{2-1}^{реальн} \cdot \frac{f_{2-2}^{прог}}{f_{2-1}^{прог}}$  для МПЧ второго

мода.

Для проверки предлагаемого метода оперативной диагностики в качестве диагностической трассы была выбрана трасса Хабаровск–Иркутск, а в качестве интересуемой радиолинии - Магадан–Иркутск. При этом при пересчете были использованы восстановленные значения МПЧ по адиабатическому соотношению  $\chi$  в условиях возмущенной ионосферы или в случае, когда МПЧ первого мода превышала предельную частоту ЛЧМ - ионозонда. Результаты оперативного прогноза по методу прямой диагностики приведены на рис. 3. На этих графиках построены суточные зависимости прогнозных (сплошная линия), экспериментальных (кружки) МПЧ на трассе Магадан–Иркутск, и значений МПЧ, пересчитанных по отношению МПЧ различных радиотрасс (треугольники).

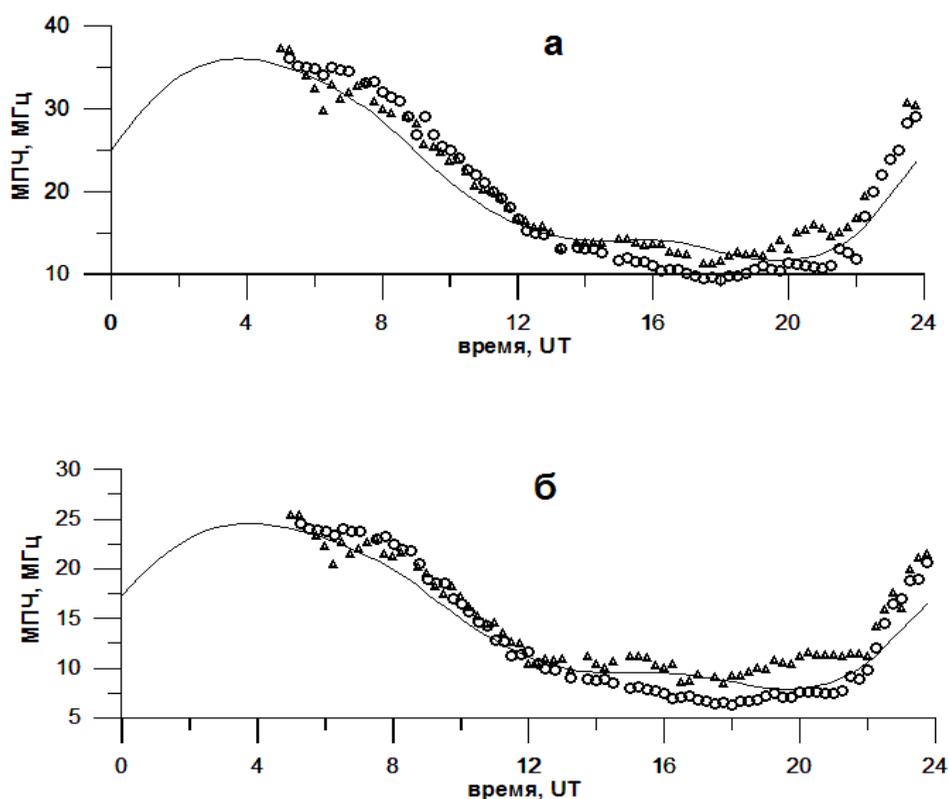


Рис. 3. Результаты оперативного прогноза по методу прямой диагностики на трассе Магадан – Иркутск 29.04.1998: а – мод 1F2, б - 2F2

### Алгоритмы выбора оптимальных частот

Существует несколько подходов к выбору оптимальных рабочих частот радиосвязи. Наиболее простым является подход, основанный на выборе ОРЧ относительно максимальной из всех МПЧ модов, которая, как правило, соответствует МПЧ мода минимальной кратности в F-канале. За ОРЧ принимается значение, равное 0.85 МПЧ. На коротких трассах при данном выборе ОРЧ часто оказывается, что принимаемый сигнал на данной частоте будет многолучевым. В этом случае можно

скорректировать ОРЧ, исходя из заданного коэффициента защиты радиолинии [8], который определяет минимально возможное отношение сигнал/помеха, при котором связь осуществляется с заданной надежностью. Для заданных параметров радиолинии (мощность передатчика, антенны, полоса сигнала) определяются интервалы рабочих частот радиосвязи, в которых отношение сигнал/помеха превышает значение коэффициента защиты. Уровень помех рассчитывается по известным моделям атмосферных и станционных помех [9,10], или может быть измерен в процессе зондирования ионосферы.

При использовании модемов и широкополосной КВ радиосвязи предпочтительнее использовать критерий выбора оптимальных рабочих частот, основанный на функциональной связи вероятности ошибки, усредненной по случайным параметрам сигнала, и характеристиками канала передачи информации. В этом случае необходимо проводить детальный анализ модовой структуры сигналов наклонного зондирования с определением межмодовых задержек, учетом полосы когерентности сигнала, обусловленной частотной дисперсией сигнала в ионосфере. Алгоритм выбора оптимальных рабочих частот связной радиотрассы приведен в [11].

Таким образом, методы и алгоритмы вторичной обработки ионограмм и интерпретации сигналов вертикального и наклонного зондирования ионосферы позволяют выделять треки на ионограммах и проводить их идентификацию. Для вертикального зондирования производится отсчет ионосферных параметров: критических частот и минимальных высот отражения для каждого ионосферного слоя. В случае правильной идентификации всех слоев ВЧХ по трекам рассчитываются характеристики наклонного распространения: дистанционно-частотная характеристика, максимальные применимые частоты (МПЧ) модов распространения и уровень сигнала на входе приемника. В случае НЗ данные методы позволяют проводить оперативное определение модового состава, МПЧ каждого мода, строить ДЧХ сигнала по значимым точкам амплитудного рельефа сигнала и проводить идентификацию модов распространения. На основе разработанных методов созданы алгоритмы прямой диагностики декаметрового радиоканала по данным ВЗ и НЗ, на основе которых проводится оперативный выбор рабочих частот связного радиоканала.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 08-05-00658).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Grozov V.P Processing of ionograms – statistical approach // Proceedings of International Symposium on Radio Propagation (ISRP'97). –Qingdao, China. –1997. P.225-228.
2. Lee J.S. Digital Image Smoothing and the Sigma Filter // Computer Vision. Graphics and Image Processing. –1983. V.21, № 3. –P.255-269.
3. Grozov V.P., Nosov V.E, Ososkov G.A., Zaznobina E.G. Artifical neural networks for computer-aided ionogram analysis // Computer Aided Processing of Ionograms and Ionosonde Records: Edit by P.J. Wilkinson. –Boulder, USA, 1998. –P.30-34.
4. Bilitza D. International Reference Ionosphere 2000 // Radio Science. –2001.–V.36, No 2. –P.261-275.
5. Поляков В.М., Суходольская В.Е. и др. Полуэмпирическая модель ионосферы / МГК. –М., 1986. –139 с.
6. Михайлов С.Я. Многозначность восстановления профилей плазменной частоты по заданной ВЧХ и их различимость для наклонного распространения коротких радиоволн в изотропной ионосфере // Изв.вузов. Радиофизика. –2000. – Т. XLII, № 10. –С.855-872.
7. Куркин В.И., Носов В.Е., Пономарчук С.Н., Савков С.С., Чистякова Л.В. Метод оперативной диагностики КВ радиоканала // Исследования по геомагнетизму, аэрономии и физике солнца. –Новосибирск, 1993. –Вып.100. –С.168-188.
8. Шлионский Ш.Г. Инструкция по расчету КВ-линий радиосвязи.Изд. ИЗМИРАН, 1961. 125 с.
9. Documents of the VIII Plenary Assembly CCIR. –Geneva, 1957. –V. VII, doc.65. –324 p.
10. Бабенков В.Г., Кузьмин Б.И. Автоматизация расчетов декаметровых радиолоний // Техника средств связи. Серия СС. –1988. –Вып.6. –С.100-108.
11. Урядов В.П. Алгоритм выбора оптимальных рабочих частот для узкополосных и широкополосных сигналов по данным НЗ ионосферы непрерывным ЛЧМ сигналом: Препринт № 374. – Н.Новгород: НИРФИ, 1993. –12 с.