

References

1. Potekhin A. P., Medvedev A. V., Zavorin A. V. et al. *Kosmicheskie issledovaniya*, 2008. Vol. 46, № 4, pp. 356–362.

2. Khakhinov V. V., Potekhin A. P., Lebedev V. P. et al. *Zhurnal Radioelektroniki*. 2010. P. 555–571. Available at: http://jre.cplire.ru/jre/library/Ulan-Ude-2010/pdf/files/s2_35.pdf.

© Хахинов В. В., Потехин А. П., Лебедев В. П., Кушнарев Д. С., Алсаткин С. С., 2012

УДК 621.371.3; 621.376.3; 550.388.2

ОБРАБОТКА И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ИОНОГРАММ ВЕРТИКАЛЬНОГО И НАКЛОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ИОНОСФЕРЫ НА БАЗЕ ЛЧМ-ИОНОЗОНДА*

С. Н. Пономарчук, В. П. Грозов, Г. В. Котович, С. Я. Михайлов

Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук
Россия, 664033, Иркутск, а/я 291.

E-mail: spon@iszf.irk.ru, grozov@iszf.irk.ru, kotovich@iszf.irk.ru, mikh@iszf.irk.ru

Рассмотрены методики и алгоритмы вторичной обработки и интерпретации ионограмм, получаемых на базе ЛЧМ-ионозонда, работающего в режиме вертикального и наклонного зондирования ионосферы (ВЗ и НЗ). Вторичная обработка экспериментальных ионограмм проводится на основе фильтрации исходных данных с последующим сжатием их методом клеточного автомата. Методика интерпретации ионограмм основана на использовании результатов моделирования частотных зависимостей характеристик распространения в режиме долгосрочного прогноза и результатов обработки экспериментальных данных. Разработан алгоритм восстановления профиля электронной концентрации по выделенным трекам ВЧХ.

Ключевые слова: ионосфера, ионограмма, распространение радиоволн.

THE PROCESSING AND INTERPRETATION OF VERTICAL AND OBLIQUE SOUNDING IONOGRAMS FOR IONOSPHERE DIAGNOSTICS ON THE BASE OF CHIRP-IONOSONDE

S. N. Ponomarchuk, V. P. Grozov, G. V. Kotovich, S. Ya. Mikhailov

Institute of Solar-Terrestrial of Russian Academy of Sciences, Siberian Branch
P/O Box 291, Irkutsk, 664033, Russia.

E-mail: spon@iszf.irk.ru, grozov@iszf.irk.ru, kotovich@iszf.irk.ru, mikh@iszf.irk.ru

In the paper the authors consider techniques and algorithms for secondary processing and interpretation of ionograms obtained with the help of chirp ionosonde operating in vertical and oblique sounding mode (VS and OS). The secondary processing of experimental ionograms is carried out on the base of primary data filtering with subsequent compression with a help of cellular automaton technique. Ionogram interpretation methods is based on modeling results for frequency dependences of propagation characteristics in the regime of long-term forecast and on results of experimental data processing. We also develop the algorithm for electron concentration profile restoration on the base of HFC selected tracks.

Keywords: ionosphere, ionogram, radio wave propagation.

Ионосферные линии связи являются составной частью радиотехнических систем передачи информации, использующих для своей работы радиоволны дециметрового диапазона. Одним из эффективных средств исследования диагностических возможностей КВ-радиосредств и влияния космической погоды на условия распространения радиоволн является ЛЧМ-ионозонд [1]. Необходимым элементом системы диагностики и прогнозирования ионосферы и условий распространения радиоволн КВ-диапазона

является высокоэффективное программное обеспечение, использующее современные модели среды, усовершенствованные методы расчета характеристик сигналов и анализа экспериментальных данных в режиме, близком к реальному времени. Принципиальным является автоматизация процесса обработки, которая может быть решена при условии эффективного обнаружения сигнала на фоне помех и выделение его на ионограмме с последующей идентификацией.

* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (государственный контракт № 14.518.11.7065, соглашение № 8388) и грантов РФФИ (№ 13-05-00979-а, № 11-05-00892).

Методы и алгоритмы вторичной обработки.

Выделим основные моменты вторичной обработки. По результатам спектрального анализа формируется ионограмма. На ионограмме можно выделить три основных типа объектов: полезный сигнал, фоновый шум, сосредоточенные помехи, одиночные выбросы. Основной проблемой при решении задачи автоматической обработки ионограмм является выделение следов на ионограмме, удовлетворяющих некоторым критериям, с последующим определением точек со значимой амплитудой. Рассматривая ионограмму как сложное изображение, можно воспользоваться методами теории обработки изображений.

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 [2], 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. 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.

Методика сжатия данных [2] 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. Реализованный в программном комплексе алгоритм позволил достигнуть сжатия исходной информации до 5–10 раз в зависимости от уровня шума и диффузности [3].

Методика интерпретации ионограмм ВЗ. Методика интерпретации ионограмм ВЗ основана на использовании результатов моделирования высотно-частот-

ной характеристики (ВЧХ) в режиме долгосрочного прогноза (ДП) и результатов обработки экспериментальных ионограмм. Используя модели ионосферы, например, IRI как стандартный вариант модели ионосферы [4] или полуэмпирическую модель ПЭМИ [5], рассчитывается ВЧХ вертикального распространения.

Полученная вчх 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. В результате интерпретации ионограммы ВЗ формируется в виде треков высотно-частотная характеристика, по которой рассчитывается профиль электронной концентрации. Реализован вариант восстановления профиля $n(h)$ посредством развития метода Джексона численного решения интегральных уравнений с повышением точности метода в областях максимумов слоев (для критических частот отражения) и долин [6]. Результаты автоматической интерпретации ионограммы ВЗ показаны на рис. 1.

Методика интерпретации ионограмм НЗ. Методика основана на использовании результатов моделирования дистанционной частотной характеристики (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:

– отношение группового пути P_m в точке смыкания нижнего и верхнего лучей какого-либо мода к длине трассы;

– отношение максимальной применимой частоты (МПЧ) модов 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 ДП. Исходя из этого, строится модельная маска для мода минимальной кратности слоя F, включающая в себя две полосы шириной ΔP км (по вертикали) и протяженностью по частоте от μf_m^p до f_m^p , где f_m^p – прогнозная МПЧ опорного мода, для нижнего луча, и протяженностью от νf_m^p до f_m^p – для верхнего луча.

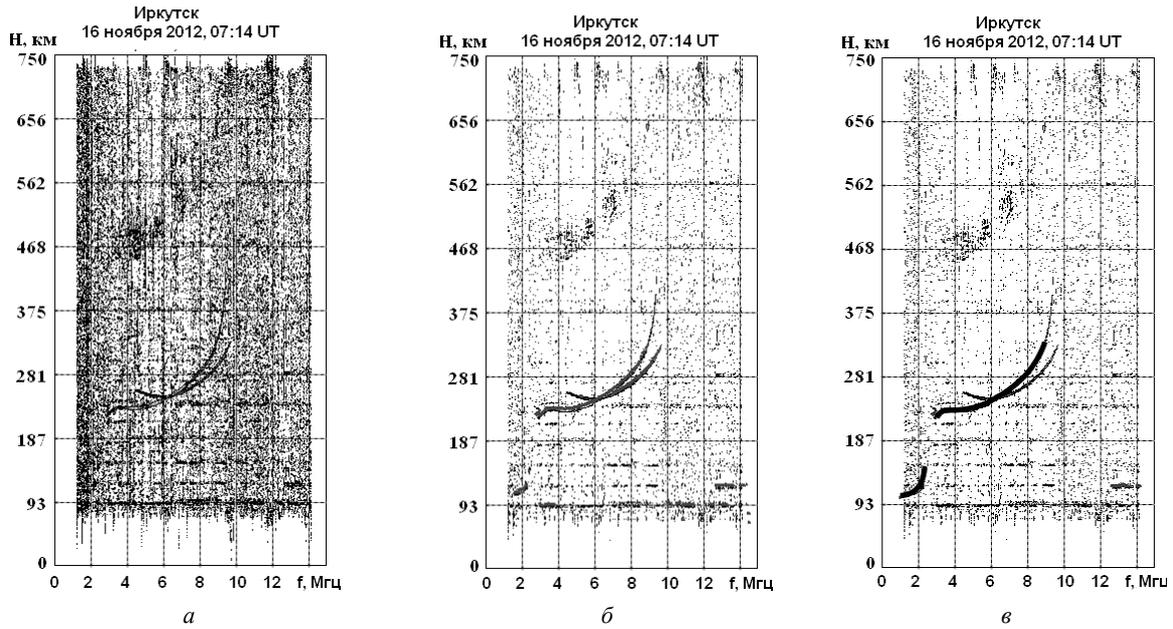


Рис. 1. Ионограмма ВЗ (а) и результаты вторичной обработки (б) и интерпретации (в), 16 ноября 2012 г., 07:14 UT

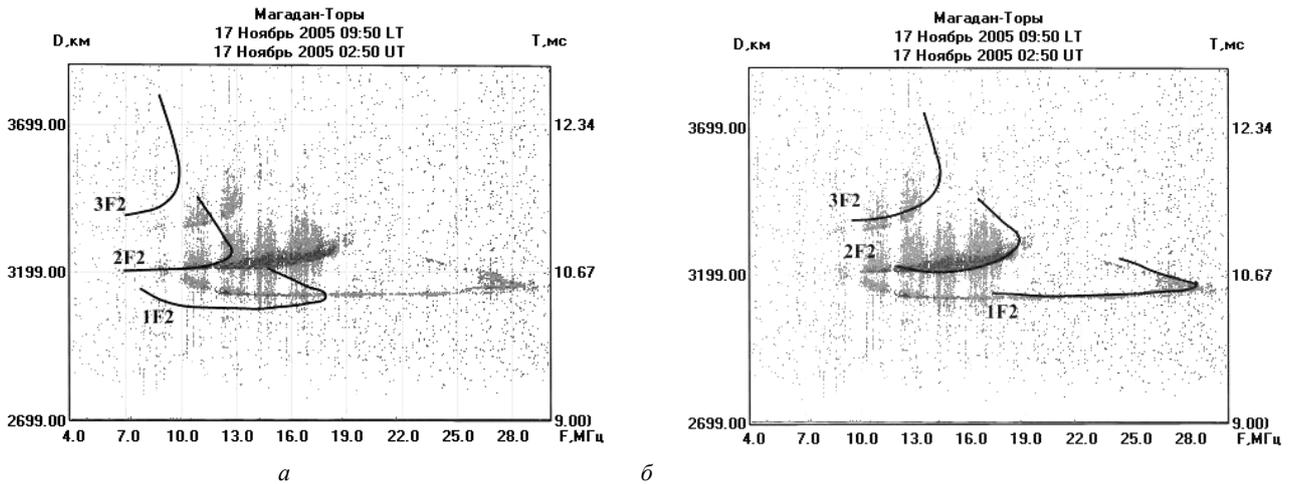


Рис. 2. Ионограмма наклонного зондирования и результаты интерпретации, 17 ноября 2005 г., 02:50 UT

Алгоритм идентификации опорного следа на ионограмме заключается в подсчете числа моментов прихода сигналов при движении модельной маски по экспериментальным точкам 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 Δf и ΔP подбираются, исходя из разрешимости ионозонда по дальности и частоте. Максимальное значение количества экспериментальных точек n_i , запоминаются.

В случае определения f_m^r и P_m^r оставшиеся экспериментальные точки, соответствующие моду первой кратности, идентифицируются путем удлинения по-

лос 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.

Результаты прогноза и результат автоматической интерпретации ионограммы НЗ, полученной 17 ноября 2005 г. в 02:50 UT на трассе Магадан–Иркутск, показаны на рис. 2.

Статистическая оценка точности автоматической обработки ионограмм ВЗ была проведена по экспериментальным данным вертикального зондирования за 2012–2013 гг. на базе цифрового многофункционального ЛЧМ-ионозонда, разработанного в ИСЗФ СО РАН.

Проверка показала, что количественные характеристики качества методики интерпретации ионограмм ВЗ и НЗ не уступают лучшим мировым образцам подобных программ.

Рассмотренные методы и алгоритмы вторичной обработки ионограмм и интерпретации сигналов вертикального и наклонного зондирования ионосферы реализованы в виде программного комплекса, позволяющего в автоматическом режиме выделять треки на ионограммах и проводить их идентификацию. Для вертикального зондирования по трекам производится отсчет ионосферных параметров и по ВЧХ рассчитывается профиль электронной концентрации $N(h)$. Для наклонного зондирования разработанные методы анализа ионограмм позволяют проводить оперативное определение модового состава, МПЧ каждого мода, строить ДЧХ сигнала и проводить идентификацию модов распространения.

Апробация разработанных методик на большом массиве экспериментальных данных показала, что он способен работать в автоматическом режиме. При этом количественные характеристики качества его работы не уступают лучшим мировым образцам подобных программ.

Библиографические ссылки

1. ЛЧМ-ионозонд и его применение в ионосферных исследованиях / В. А. Иванов, В. И. Куркин, В. Е. Носов и др. // Известия вузов. Радиофизика. 2003. Т. 46, № 11. С. 919–952.
2. Grozov V. P. Processing of ionograms – statistical approach // Proc. of Intern. Symp. on Radio Propagation (ISRP'97). 1997. P. 225–228.
3. Grozov V. P., Nosov V. E., Ososkov G. A., Zaznobina E. G. Artificial neural networks for computer-aided ionogram analysis // Computer Aided Proc. of Ionograms and Ionosonde Records. 1998. P. 30–34.

4. Bilitza D. International Reference Ionosphere 2000 // Radio Science. 2001. Vol. 36, № 2. P. 261–275.

5. Полуэмпирическая модель ионосферы для широкого диапазона геофизических условий / В. М. Поляков, В. Е. Суходольская, М. К. Ивельская и др. М.: МЦД-Б, 1986.

6. Михайлов С. Я. Многозначность восстановления профилей плазменной частоты по заданной ВЧХ и их различимость для наклонного распространения коротких радиоволн в изотропной ионосфере // Известия вузов. Радиофизика. 2000. Т. XLII, № 10. С. 855–872.

7. Метод оперативной диагностики КВ радиоканала / В. И. Куркин, В. Е. Носов, С. Н. Пономарчук и др. // Исследования по геомагнетизму, аэронауке и физике солнца. 1993. Вып. 100. С. 168–188.

References

1. Ivanov V. A., Kurkin V. I., Nosov V. E., Uryadov V. P., Shumaev V. V. Radiophysics and Quantum Electronics, 2003, vol. 46, no. 11, pp. 821–851.
2. Grozov V. P. Proceedings of International Symposium on Radio Propagation (ISRP'97), Qingdao, China, 1997, pp. 225–228.
3. Grozov V. P., Nosov V. E., Ososkov G. A., Zaznobina E. G. Computer Aided Processing of Ionograms and Ionosonde Records: Edit by P.J. Wilkinson, Boulder, USA, 1998, pp. 30–34.
4. Bilitza D. Radio Science, 2001, vol. 36, no 2, pp. 261–275.
5. Polyakov V. M., Sukhodol'skaya V. E., Ivel'skaya M. K. et al. MTsDB, Moscow, 1986, p.136.
6. Mikhailov S. Ya. Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Radiofiz, 2000, 42 (10), pp. 855–872.
7. Kurkin V. I., Nosov V. E., Ponomarchuk S. N., Savkov S. S., and Chistyakova L. V. Researches on Geomagnetism, Aeronomy and Solar Physics, Novosibirsk, 1993, Issue 100, pp. 168–188.

© Пономарчук С. Н., Грозов В. П., Котович Г. В., Михайлов С. Я., 2013

УДК 537; 629.784; 533.95

ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ИОНОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ НА ИРКУТСКОМ РАДАРЕ НЕКОГЕРЕНТНОГО РАССЕЯНИЯ*

В. П. Лебедев, А. В. Медведев, М. В. Толстиков

Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук
Россия, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 126а. E-mail: lebedev@iszf.irk.ru

Представлено описание интерференционных наблюдений ионосферных неоднородностей на ИРНР. Показана возможность использования амплитуды коэффициента когерентности НР-сигнала для анализа волновых возмущений и абсолютной калибровки разности фаз между каналами антенны ИРНР по текущему значению фазы коэффициента когерентности.

Ключевые слова: интерферометрия, иркутский радар некогерентного рассеяния, ионосфера, волновые возмущения.

* Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (Государственный контракт № 14.518.11.7065, соглашения № 8388 и 8699) и РФФИ (гранты № 13-05-00456-а и 13-0200957-а).