

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).

INTERFERENTIAL MEASUREMENTS OF IONOSPHERIC DISTURBANCES ON THE IRKUTSK INCOHERENT SCATTERING RADAR

V. P. Lebedev, A. V. Medvedev, M. V. Tolstikov

Institute of Solar-Terrestrial Physics of Russian Academy of Sciences, Siberian Branch
126a Lermontov st., Irkutsk, 664033, Russia. E-mail: lebedev@iszf.irk.ru

In the work the authors present the description of radar interferential measurements of ionospheric inhomogeneities made with the Irkutsk incoherent scatter radar (IISR). The possibility of use of coefficient of coherence of incoherent scatter signal for the analysis of wave indignations and absolute calibration of difference of phases between IISR channels on current value of a phase is described as well.

Keywords: Interferometry, Irkutsk Incoherent Scattering Radar, Ionosphere, Ionospheric disturbances.

Формирование интерференционной ДН на ИРНР.

ИРНР представляет собой моностатический импульсный радиолокатор с частотным сканированием в направлении Север-Юг в секторе $\pm 30^\circ$ путем изменения несущей частоты в диапазоне 154–162 МГц. Частота следования импульсов – 24,4 Гц [1].

Формирование широкой ДН в угломестной плоскости обеспечивает рупор, разделенный металлической перегородкой на две равные части (два полурупора), каждая из которых связана со своим приемным и передающим трактом и имеющих электрический контакт со щелевой панелью.

Возбужденная щелями волна распространяется в рупоре между разделительной перегородкой и нижней (западной)/верхней (восточной) плоскостью рупора. За счет резкого и несимметричного изменения размеров рупора за перегородкой, кроме основной волны, возникают волны высших типов. Эти волны, распространяясь далее по рупору с разными скоростями, приходят к его раскрытию с разными амплитудами и фазами.

В результате в раскрытии рупора получается несимметричное амплитудное распределение соответствующее нижнему и верхнему полурупору, максимум которого сдвинут соответственно в западном (восточном) направлении.

На излучение оба полурупора работают синфазно, т. е. можно считать, что в раскрытии рупора формируется поле, которое определяется только основной волной, т. е. в данном случае антенну ИРНР можно рассматривать как рупорную антенну без металлической перегородки. Прием и регистрация сигнала ведется отдельно на каждом полурупоре и ДН на прием верхнего и нижнего полурупоров определяются соответственно своим распределением поля. Таким образом, комплексно переменная сигналы от верхнего и нижнего полурупоров можно сформировать интерференционную диаграмму направленности.

Интерференционные измерения на ИРНР. Основным объектом исследования в интерференционных измерениях, который связывают с характеристиками среды, является нормированный коэффициент корреляции радиолокационных сигналов принятых на двух и более разнесенных антеннах.

В работе [2] показано, что ИРНР может рассматриваться как интерферометр с базой $A = 5$ м, эффек-

тивной шириной гауссовой ДН передатчика и приемников $\gamma_{\Sigma,0.5} = 4,56$ град. Для рассеивающей структуры гауссовой формы шириной σ_γ и положением центра в направлении γ_0 (антенный угол места), получено выражение для коэффициента корреляции η с учетом специфики антенной системы ИРНР:

$$\eta = SN \cdot \exp\left(ik_\phi \gamma_0 \frac{\Sigma^2}{\Sigma^2 + \sigma_\gamma^2}\right) \exp\left(-\frac{\Sigma^2 \sigma_\gamma^2 k_\phi^2}{2(\Sigma^2 + \sigma_\gamma^2)}\right), \quad (1)$$

где $k_\phi = 16^\circ$ – наклон фазо-угломестной характеристики ИРНР; $\Sigma = 0,067447$, SN – отношение «сигнал–шум».

В эксперименте, для каждой задержки (дальности) могут быть определены: модуль коэффициента корреляции $|\eta|$ и его фаза $\arg(\eta)$, на основе выражения (1) могут быть получены: угол места центра тяжести цели γ_0 и характерный размер цели σ_γ вдоль угломестного направления в антенной системе координат ИРНР:

$$\sigma_\gamma^2 = -\frac{2 \ln(|\eta|) \Sigma^2}{2 \ln(|\eta|) + \Sigma^2 k^2}, \quad (2)$$

$$\gamma_0 = \frac{\Sigma^2 + \sigma_\gamma^2 \arg(\eta)}{\Sigma^2 k}. \quad (3)$$

Если в выражении (1) для аргумента когерентности $\arg(\eta)$ характерный размер цели σ_γ устремить к бесконечности, тогда $\arg(\eta) = 0$, данный факт используется для абсолютной калибровки разности фаз между антеннами на EISCAT на основе интерференционных наблюдений НР – сигнала [3].

Динамика коэффициента когерентности, полученная в наблюдениях 15 февраля 2011 г. приведена на рис. 1. В измерениях использовался сигнал длительностью 200 мкс, частота 155,5 МГц (длина волны 193 см). На рис. 1 отчетливо видны замеры сигнала, связанные с вращением плоскости поляризации (эффект Фарадея), в выражении для коэффициента когерентности (1) они описываются SN – отношением «сигнал–шум».

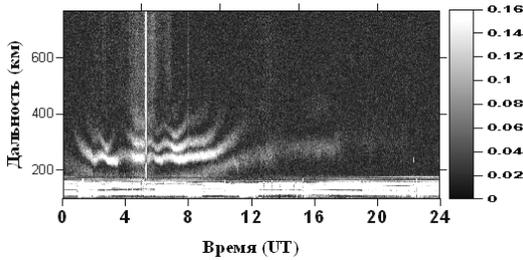


Рис. 1. Динамика амплитуды коэффициента когерентности 15 февраля 2011 г.

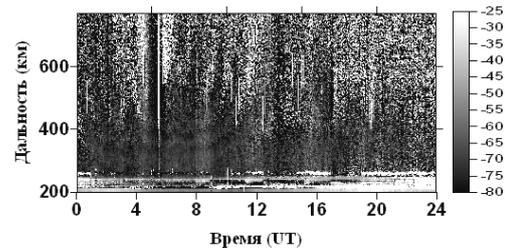


Рис. 2. Динамика разности фаз между полуупорами (кросскорреляционная фаза) 15 февраля 2011 г.

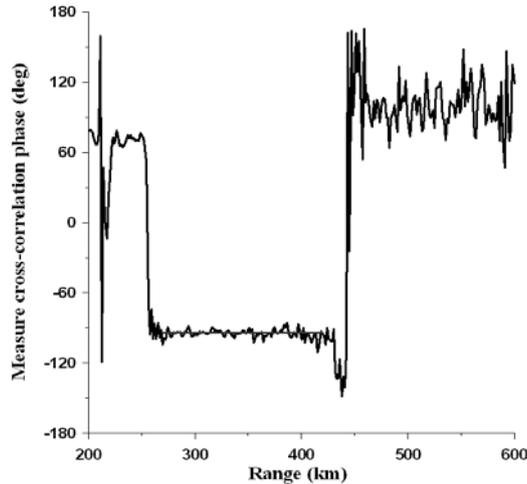


Рис. 3. Высотный профиль кросскорреляционной фазы

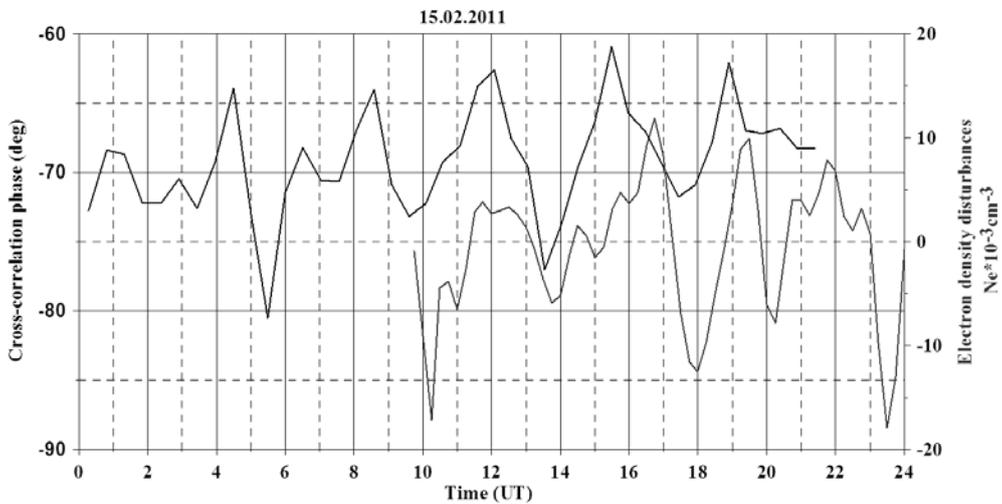


Рис. 4. Динамика кросскорреляционной фазы (черная линия) и вариации плотности электронов (серая линия)

Измеренный модуль коэффициента корреляции 15 февраля 2011 г. согласно выражению (2) соответствовал ширине рассеивателя $\sigma_r \approx 2...3^\circ$ или размеру неоднородности 8–13 км на высоте 250 км.

Динамика разности фаз между полуупорами, полученная в наблюдениях 15 февраля 2011 г., приведена на рис. 2. В измерениях использовался сигнал длительностью 750 мкс, частота 155,5 МГц.

Видно, что в диапазоне высот 300–400 км, кросскорреляционная фаза сигнала НР практически постой-

янна и может быть использована для абсолютной фазовой калибровки антенн [3]. Высотный профиль кросскорреляционной фазы: уровень до высоты 250 км соответствует отражению от местных гор, 270–420 км кросскорреляционная фаза сигнала НР (может использоваться для калибровки интерферометра), выше 450 км шум, приведен на рис. 3.

Динамика кросскорреляционной фазы сигнала НР и вариации плотности электронов в измерениях 15.02.2011 г. приведена на рис. 4. Из рисунка видно,

что в рассматриваемый день наблюдаются синхронные возмущения как в кросскорреляционной фазе сигнала ИР, так и в плотности электронов. Теоретически существует возможность связать скорость изменения фазы со скоростью ветра вдоль угломестного направления в антенной СК. Возможности ИРНР позволяют также исследовать коэффициент корреляции и в азимутальном направлении и получить в итоге размер (в азимутальном и угломестном направлениях) и полный вектор скорости мелкомасштабных неоднородностей пересекающих сектор сканирования ИРНР.

Антенная система ИРНР может рассматриваться как интерферометр с базой 5 м, эффективной шириной ДН передатчика и приемников 4,55 град. Получено выражение, связывающее амплитуду коэффициента когерентности и эффективный размер неоднородности гауссовой формы и аргумент коэффициента когерентности (кросскорреляционная фаза) с положением центра наблюдаемого возмущения. Выражение для коэффициента когерентности получено с учетом особенностей антенной системы ИРНР. Показана возможность использования фазы коэффициента когерентности ИР сигнала для абсолютной калибровки разности фаз между каналами антенны.

В результате проведенных измерений 15 февраля 2011 г. получена синхронная динамика вариаций кросскорреляционной фазы и плотности электронной концентрации. Полученная динамика вариаций кросскорреляционной фазы сигнала ИР и модуля коэффи-

циента когерентности может быть вызвана перемещающимися неоднородностями размером примерно 10 км.

Библиографические ссылки

1. Развитие диагностических возможностей Иркутского радара некогерентного рассеяния / А. П. Потехин, А. В. Медведев, А. В. Заворин и др. // Космические исследования. 2008. Т. 46. № 4. С. 356–362.
2. Лебедев В. П. Интерференционные наблюдения на Иркутском радаре некогерентного рассеяния // Журн. радиоэлектроники. 2010. Спец. вып. С. 555–571.
3. Grydeland Tom and Cesar La Hoz. WP5: Fundamentals of radar interferometry. One baseline. // Stage 2 report. I: April 2006 [Electronic resource]. URL: http://eiscat.se/groups/EISCAT_3D_info/WP5_Interferometry_Stage2_Report_April06.pdf.

References

1. Potekhin A. P., Medvedev A. V., Zavorin A. V. et al. Kosmicheskie issledovaniya, 2008. Vol. 46. № 4, pp. 356–362.
2. Lebedev V. P. Zhurnal Radioelektroniki. 2010. P. 555–571.
3. Grydeland Tom and Cesar La Hoz. WP5: Fundamentals of radar interferometry. One baseline. Stage 2 report. I: April 2006. Available at: http://eiscat.se/groups/EISCAT_3D_info/WP5_Interferometry_Stage2_Report_April06.pdf.

© Лебедев В. П., Медведев А. В., Толстикова М. В., 2013

УДК 551.501.8

ДВУМЕРНАЯ РАДИОТОМОГРАФИЯ ИОНОСФЕРЫ: СУЩЕСТВУЮЩИЕ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

А. А. Романов, С. В. Трусов, А. А. Романов, О. И. Барабошкин, С. А. Бобровский

ОАО «Российские космические системы»

Россия, 111250, Москва, ул. Авиамоторная, 53. E-mail: gomanov@rniikp.ru

Представлены результаты создания информационной технологии радиотомографии ионосферы и перспективы ее развития, дано описание применяемых подходов и выходных информационных продуктов. В настоящее время технология используется при создании системы мониторинга геофизической обстановки над территорией РФ.

Ключевые слова: радиотомография, томография ионосферы, информационная технология.

2-DIMENSIONAL IONOSPHERE RADIOTOMOGRAPHY: THE EXISTING AND PERSPECTIVE TECHNOLOGIES

A. A. Romanov, S. V. Trusov, A. A. Romanov, O. I. Baraboshkin, S. A. Bobrovskij

JSC “Russian Space Systems”

53 Aviamotornaya st., Moscow, 111250, Russia. E-mail: romanov@rniikp.ru

The results of ionosphere radiotomography information technology development are presented and the ways of their evolution are listed. The used algorithms, techniques and output information flows are described. This technology currently using in the construction of Russia geophysical environment monitoring system.

Keywords: radiotomography, ionosphere tomography, information technology.