

ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИОНОЗОНД «ЦИКЛОН» КАЗАНСКОГО УНИВЕРСИТЕТА И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ИОНОГРАММ

Е.Ю. Зыков, О.Н. Шерстюков, А.Д. Акчурин

*Казанский (Приволжский) федеральный университет
Россия, Казань*

В данной работе описывается ионосферный комплекс «Циклон» и система автоматической обработки ионограмм вертикального зондирования. Была разработана и протестирована программа для обработки и интерпретации ионограмм, полученных различными ионозондами.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ИОНОЗОНД, ИОНОГРАММА, АВТОМАТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

ВВЕДЕНИЕ

При исследовании ионосферы возникает ряд задач, решение которых невозможно без организации автоматизированной обработки информации о состоянии ионосферы.

Учитывая сложность обработки и интерпретируемости ионограмм, а также разнообразие и специфичность методов цифровой обработки изображений, необходимо иметь некоторые наборы алгоритмов, предназначенные для реализации каждого этапа. Данная статья описывает результаты тестирования одного из возможных методов обработки и интерпретации ионограмм, реализованного в казанском университете.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ИОНОСФЕРНОГО КОМПЛЕКСА «ЦИКЛОН»

В Казанском университете разработка семейства цифровых ионозондов «Циклон» ведется с 1983 г [1-3]. За это время было разработано несколько вариантов ионозондов соответственно развитию вычислительной техники. Последний вариант «Циклон-GPS» (далее – просто «Циклон») включает в себя: IBM-совместимый компьютер, приемное устройство

P-399A («Катран»), импульсный передатчик, GPS систему привязки шкалы времени и блок сопряжения. Обобщенная блок-схема ионозонда показана на рис 1.

Ионозонд «Циклон» (модернизации 2010 г.) имеет следующие характеристики:

- диапазон рабочих частот – 1–32 МГц,
- длительность импульса, программируемая – 10–800 мкс,
- мощность передатчика в импульсе – 3–13 кВт,
- частота следования импульсов – 1–100 Гц,
- шаг перестройки частоты программируемый – от 1 кГц,
- количество высотных отсчетов – произвольное,
- дискретность отсчета высоты – 0,8 км, 2,5 км,
- количество частот зондирования – произвольное,
- полоса пропускания приемного устройства – 40 кГц,
- разрядность оцифровки по амплитуде – 14 разрядов АЦП,
- тип используемой антенны – две скрещенные «Дельты»,

- синхронизация шкал времени – GPS-приемник,
- автоматическая обработка сигналов ионосферного зондирования,
- оперативное представление данных в интернет,
- архивация данных и их последующий анализ.

Для изучения динамики ионосферы, спорадических образований типа слоя Es и F-рассеяния, перемещающихся ионосферных возмущений ионозонд «Циклон» может быть переключен на исследовательский режим. В этом случае меняется технология управления работой ионозондом, увеличивается периодичность снятия ионограмм, повышается дискретность отсчетов по высоте, вводятся нониусные отсчеты в ограниченном высотном интервале, параллельно ведется прием сигналов наклонного зондирования на нескольких фиксированных частотах в виде минутных амплитудно-временных реализаций с предварительным исследованием эфира и автоматическим выбором динамического диапазона приемника.

Программный пакет «Циклон-Рапид» отличается большими функциональными и сервис-

ными возможностями. Он предназначен для автоматического управления работой ионозонда, проверки работоспособности, как комплекса в целом, так и отдельных его узлов, полной обработки ионограммы, как в автоматическом, так и в интерактивном режимах. Многолетняя методическая апробация пакета «Циклон-Рапид» позволила сформировать наиболее оптимальный вариант, который позволяет работать в реальном режиме работы времени, учитывает задачи комплекса и персонала, его обслуживающего. Алгоритм программы позволяет также производить сеансы зондирования ионосферы в полностью автоматическом режиме без какого-либо вмешательства оператора. При этом время автономной работы ограничено лишь емкостью жесткого диска, при необходимости сохранять на нем обработанные ионограммы и/или образы принтерных файлов при отсутствии последнего. Пакет программ реализован в виде многооконного дружественного интерфейса, объединяет ряд отдельных модулей, доступ к которым достигается через его основное меню. Общая структура программы «Циклон-Рапид» представлена на рис. 2.

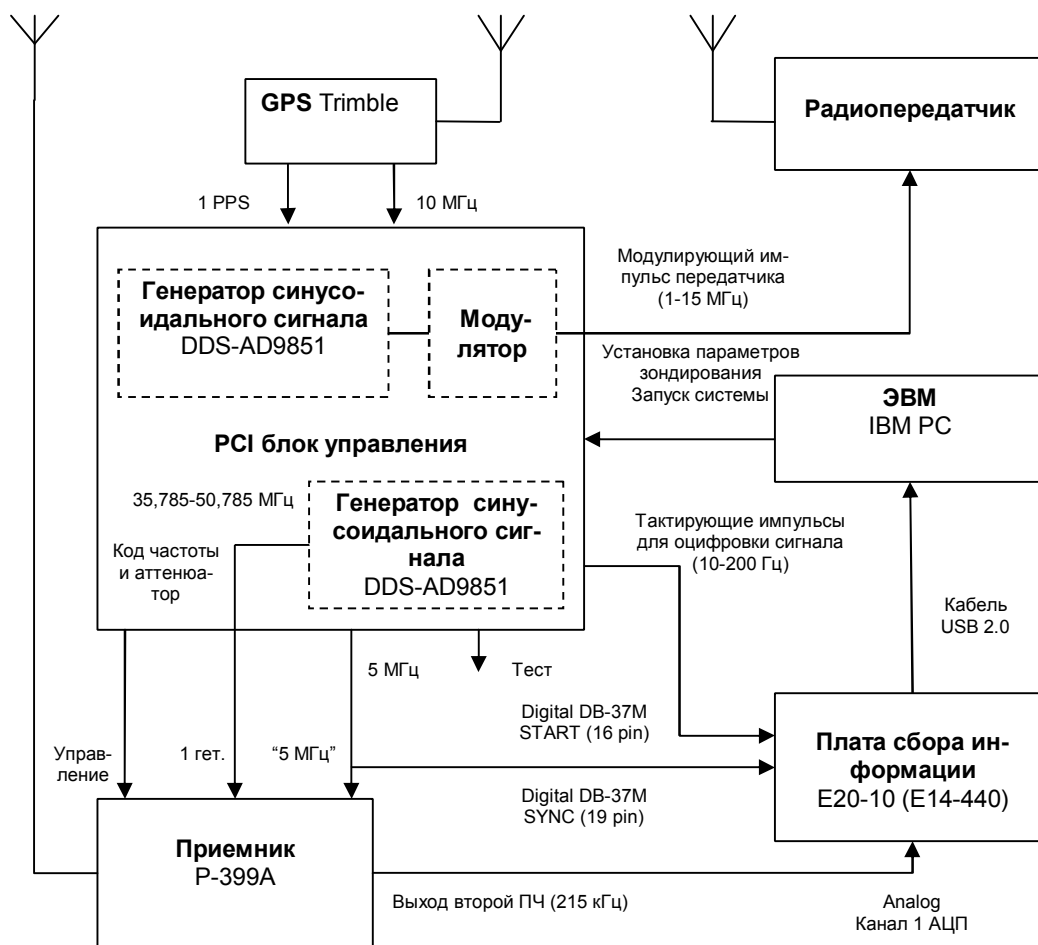


Рис. 1. Структурная схема ионозонда «Циклон»



Рис. 2. Структурная схема программного обеспечения ионозондов «Циклон»

ПРОГРАММА АВТОМАТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ИОНОСФЕРНОГО КОМПЛЕКСА «ЦИКЛОН» И ЕЕ АПРОБАЦИЯ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ИОНОГРАММАМ ВЕРТИКАЛЬНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Работы по автоматической обработке ионограмм программными средствами были начаты в Казанском университете в 1990 г. [3-4]. Последний вариант пакета программ "Циклон-Рапид" в настоящее время позволяет производить традиционную обработку ионограмм в режиме сетевого ионозонда: первичную очистку ионограмм от шумов, архивацию ионограмм для долговременного хранения на магнитном диске, идентификацию ионосферных слоев с отсчетом их высотно-частотных параметров,

сохранение результатов обработки в международном формате, рекомендованном URSI [5].

В процессе опытной эксплуатации ионосферного комплекса алгоритм автоматической интерпретации следов ионосферных слоев неоднократно подвергался модернизации. Так, в частности, для распознавания ионосферных слоев в настоящее время в программе «Циклон-Рапид» был реализован метод быстрого анализа ионосферной информации по высотным (h) и частотным (f) гистограммным распределениям ионограммы. Предложенный метод отличается намного меньшей трудоемкостью при практической реализации, связанная с меньшим количеством эмпирических правил, по сравнению с методом трафаретных масок. Программа была написана в виде модулей, встраиваемых в программное обеспечение ионосферного комплек-

са «Циклон», разработанного в Казанском университете.

Преимуществом данного метода является то, что он оперирует с относительно большими областями на ионограмме, а не с отдельными точками, и, следовательно, не так чувствителен к помехам. Такие преимущества особенно проявляются при обработке ионограмм с низким отношением сигнал/шум.

Для количественной оценки точности работы анализатора ряды данных, полученные в результате автоматической обработки, сравнивались с аналогичными рядами, обработанными вручную. Пример данных приведен на рис. 3.

Анализ полученных данных показал, что гистограммный экспресс-анализ позволяет корректно обрабатывать около 80% ионограмм. Коэффициент ранговой корреляции по Кендаллу при этом между этими реализациями рядов колеблется в диапазоне 0,8-0,84. [6]. Это сравнимо с другими алгоритмами, реализованными в промышленных ионозондах, несмотря на то, что, в отличие от комплекса «Циклон», в некоторых из них реализовано аппаратное разделение обыкновенной и необыкновенной компонент, что сильно облегчает работу программ распознавания [7-10].

Для проверки устойчивости работы алгоритмов автоматической обработки ионограмм было решено применить его к данным, полученных различными ионозондами, для чего программа обработки была дополнена специальными конверторами форматов.

К основным сложностям при переносе алгоритма для обработки ионограмм, полученных ионозондами семейства «Сойка» и «Базис» можно отнести:

- отсутствие документированного формата записи выходного файла, содержащего ионограмму;
- малая разрядность амплитуды сохраняемого в файле полезного сигнала вышеупомянутого ионосферного комплекса (8 разрядов АЦП), по сравнению с «Циклоном» (14 разрядов АЦП);
- предварительная (первичная) обработка ионограммы перед сохранением в файл;
- частотно-высотная сетка, отличающаяся от применяющейся в «Циклоне».

Рассмотрим подробнее отличия в работе программ «Циклон-Rapid» и «Сойка».

В штатной программе ионозонда «Сойка» при зондировании перед сохранением ионограммы сначала по некоторому алгоритму выясняется, содержит ли конкретная реализация полезный сигнал и в случае принятия положительного решения сохраняются отдельные от-

счеты данной реализации, судя по всему, обработанные методом пороговой фильтрации. В противном случае вся реализация не сохраняется и в дальнейшей обработке не участвует. В «Циклоне» же сохраняются все частотные реализации без какой-либо обработки и очистки, что в дальнейшем позволяет более качественно проводить анализ, очистку от шумов и автоматическую обработку ионограмм.

При модернизации ионозондов семейства «Сойка» устанавливались АЦП большей разрядности, соответственно антенные усилители перестраивались таким образом, чтобы обеспечить полный динамический диапазон их работы. Но ПО этих ионозондов, к сожалению, оперирует только с 8-ми битными полями для записи амплитудных значений, что приводит к отбрасыванию старших значащих бит. При этом форма импульса искажается, он приобретает прямоугольную форму со «столообразной вершиной», по сравнению с «колоколообразной» формой импульса, сохраняемой ионозондами «Циклон». Это также приводит к потере части полезного сигнала, что может усложнить дальнейшую обработку по алгоритмам, используемым в программе «Циклон». Для устранения этой проблемы, было решено перед обработкой каждую реализацию подвергнуть сглаживанию низкочастотным фильтром, что позволило бы приблизить форму частотной реализации к необработанной. Однако оказалось, что гистограммный метод, работая с интегральными характеристиками высотных и частотных реализаций, не нуждается в подобной предварительной обработке данных, так как полученные гистограммы сами в какой-то мере выступают в роли сглаживающих фильтров. Таким образом, алгоритмы обработки, используемые в программе «Циклон-Rapid» не подвергались никаким изменениям даже при смене входных данных, что позволяет судить о достаточной устойчивости применяющихся в них методик.

Большой сложностью явилось и отсутствие информации по формату файла ионограммы. Основные параметры зондирования, как-то: время, дату, место зондирования и значащие частоты удалось выявить при непосредственном просмотре бинарного файла данных. Алгоритм восстановления высот отчасти был разработан специалистами из ИЗМИРАН (Ким В.Ю.) и КФУ (Насыров И.А.). Но, к сожалению, некоторые поля не удалось идентифицировать и поэтому они не использовались при выводе ионограммы. К таким полям можно отнести слово данных, стоящее перед каждой частотной реализацией и содержащее, скорее всего, коэффи-

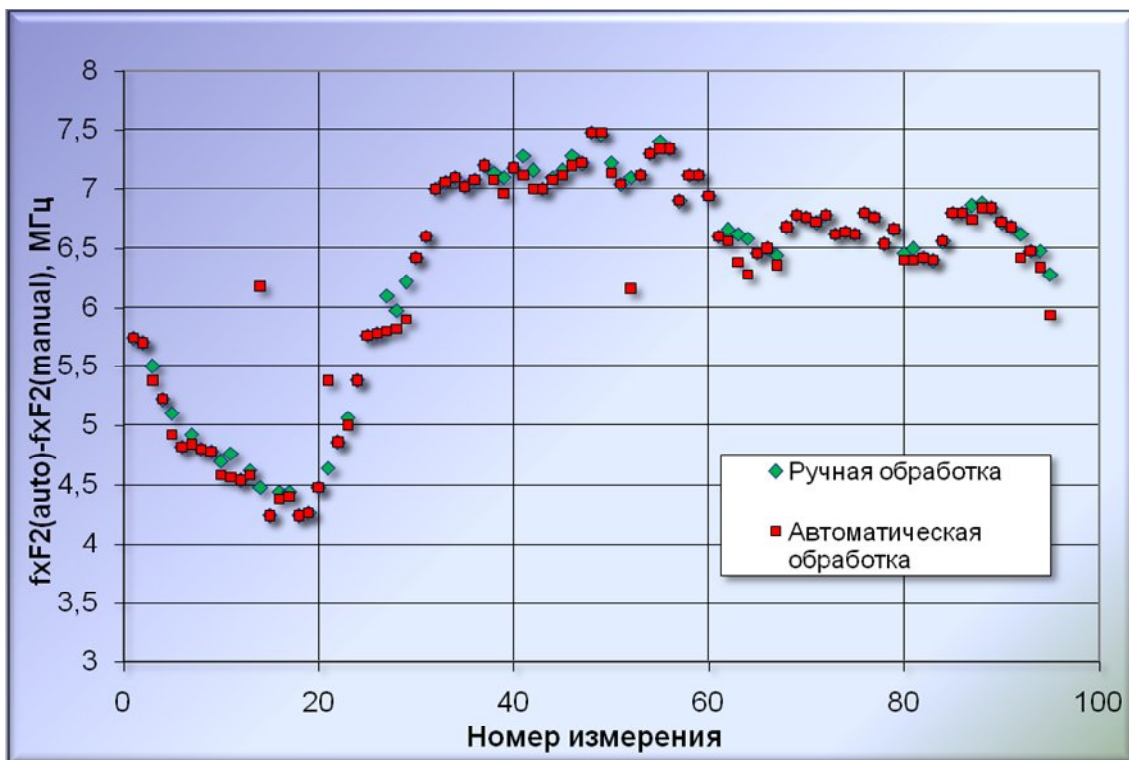


Рис. 3. Пример рядов данных, полученных при автоматической и ручной обработке

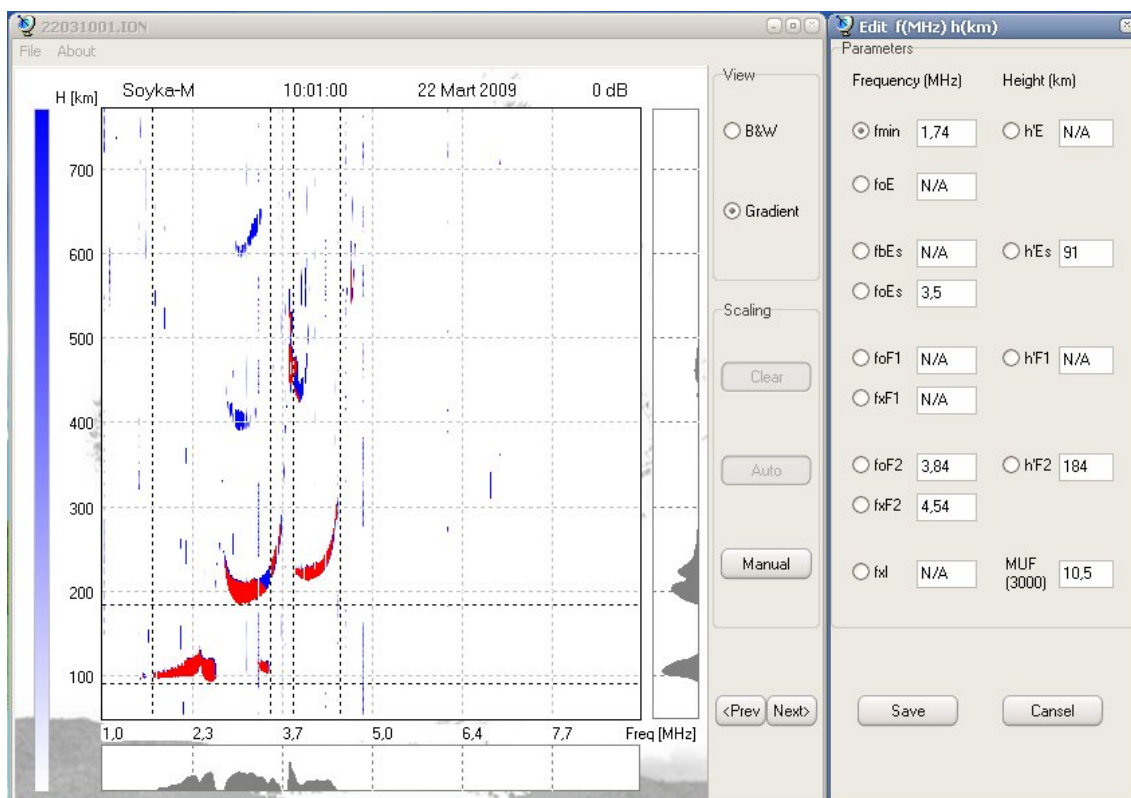


Рис. 4. Пример обработанной ионограммы ионозонда «Сойка»

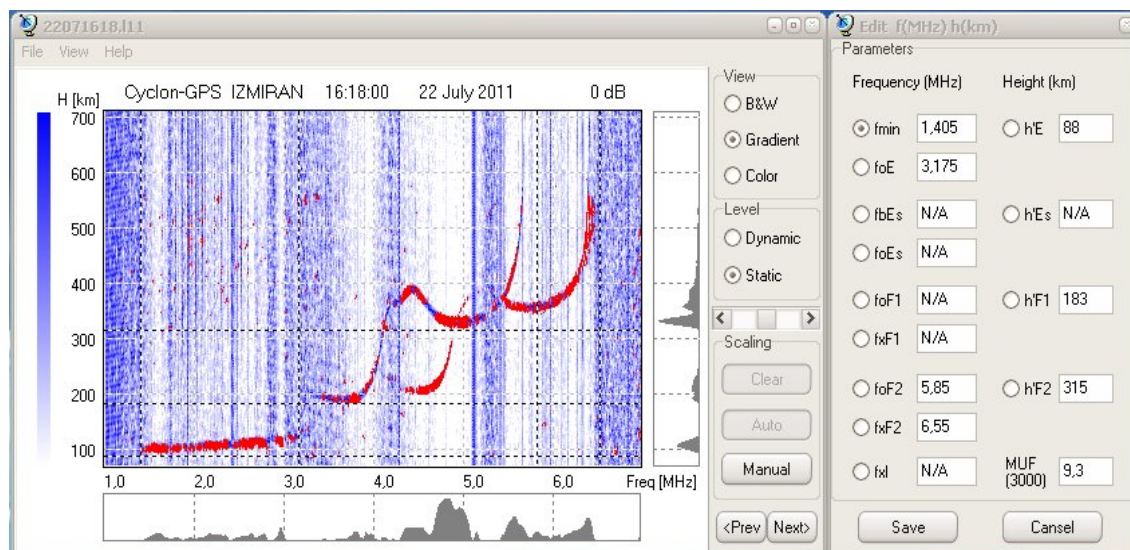


Рис. 5. Пример обработанной ионограммы ионозонда «Базис-МС»

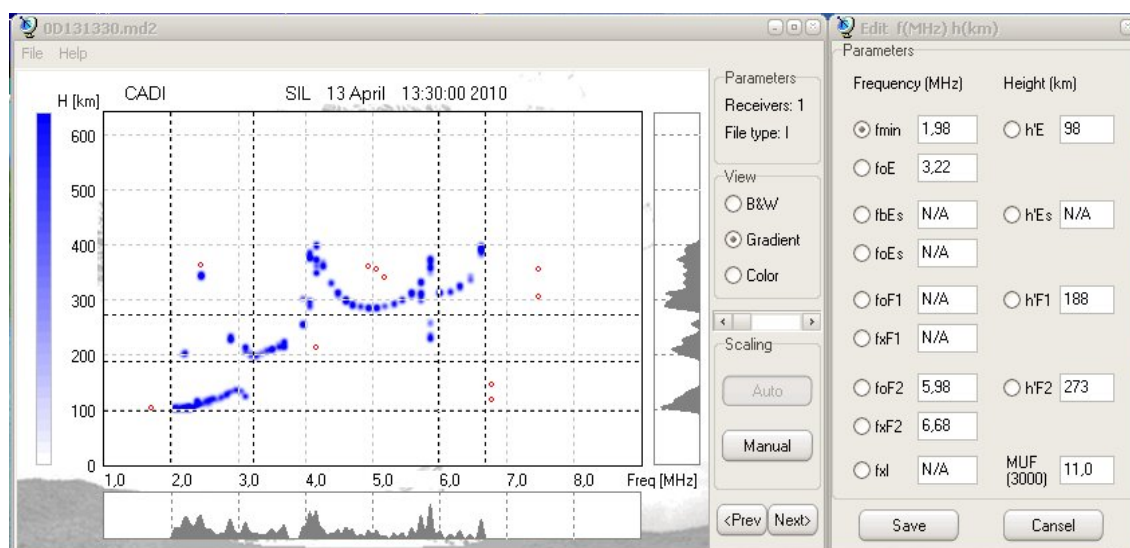


Рис. 6. Пример обработанной ионограммы ионозонда CADI

циенты аттенюации на данной частоте. Дополнительно выяснилось, что записанные файлы содержат большее количество высотных отсчетов, чем выводит на экран штатное ПО этих ионозондов, что следует учитывать при обработке ионограмм этого формата в будущем.

Также при выводе на экран ионограмм необходимо было откалибровать высотную сетку, в частности, значение начальной высоты и шаг. Эти значения, зависящие от аппаратной части ионозондов, не заносились в файлы ионограммы и поэтому подбирались эмпирическим путем.

В результате работы была написана программа, позволяющая выводить и обрабатывать ионограммы, полученные комплексами «Сойка» или «Базис». Пример обработанной ионо-

граммы приведен на рис. 4. Здесь и далее для простоты восприятия не показаны критические частоты O и X компонент слоя F1 (если он существует), их выделение при известных значениях частотных и высотных параметров остальных ионосферных слоев не вызывает затруднения.

Хорошо видно, что после обработки достаточно хорошо удалились даже те шумы, которые остались после очистки штатным ПО ионозонда «Сойка». Выяснено, что алгоритмы очистки и выделения параметров ионосферных слоев работают устойчиво даже без адаптации ко входным ионосферным данным. К сожалению, все эти ионограммы были сняты в момент минимальной солнечной и геомагнитной активности, что не позволяет в полной степени

оценить точностные характеристики обработки для всех слоев, поэтому для определения этих параметров работа должна быть продолжена в дальнейшем для более глубокого анализа на основе более длинного ряда данных.

Аналогично устойчивость алгоритма проверялась на пробных ионограммах модернизируемого ионозонда семейства «Базис» («Базис-МС»).

Хотя в ионозондах «Циклон» и «Базис-МС» используются общий формат ионограмм и может применяться один и тот же тип системы сбора данных (E1-440 или E20-10 фирмы L-Card), они имеют в своем составе разные антенно-фидерные и радиопередающие устройства, что приводит к различиям в АЧХ их радиотрактов, отношении сигнал/шум и в форме отраженного от ионосферы радиоимпульса.

Также к исторически сложившимся особенностям ионозондов серии «Базис» можно отнести:

- выход сигнала с НЧ-выхода РПУ «Р-399»,
- использование штатной АРУ РПУ и, как следствие, переусиление сигнала, приводящее к появлению на ионограмме дополнительных шумов,
- накопление несколько импульсов на частоте, что может приводить к искажению формы отраженного импульса.

Несмотря на это алгоритм обработки, также без предварительной адаптации, продемонстрировал устойчивую работу, что показывает рис. 5.

В последнее время алгоритм был протестирован на ионограммах, полученных ионозондами САДИ. Использовались данные, полученные ионозондами, установленными в НИРФИ (п. Васильсурск) и ИЗМИРАН (г. Троицк).

Используемое в ионозондах САДИ программное обеспечение осуществляет первичную очистку ионограмм от шума по собственным, гибко настраиваемым алгоритмам, и сохраняет в выходные файлы лишь максимумы отраженного сигнала.

Несмотря на то, что ионозонды имели различную аппаратную конфигурацию (НИРФИ – 2 приемных канала, ИЗМИРАН – 1 приемный канал) и использовали различные программные методы накопления сигнала и первичной обработки ионограмм, выяснилось, что алгоритмы, используемые для обработки данных ионозонда «Циклон» в состоянии справиться и с такими нестандартными для него ионограммами, что демонстрирует рис. 6. Окружностями показаны шумы, найденные и выделенные алгоритмом очистки программы «Циклон-Рapid».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработанный алгоритм обработки ионограмм вертикального зондирования при применении созданных конверторов форматов может применяться для обработки данных, полученными различными ионозондами вертикального зондирования, что позволяет упростить процесс создания единых ионосферных баз данных.

2. Созданное программное обеспечение позволяет корректно обрабатывать около 80% ионограмм. Коэффициент ранговой корреляции по Кендаллу при этом между рядами данных, полученных автоматической и ручной обработкой, колеблется в диапазоне 0,8–0,84. Метод гистограммных распределений позволил на порядок увеличить скорость обработки ионограмм, не ухудшая качество конечного результата.

3. Созданная система устойчиво обрабатывает ионограммы, полученные в условиях средневозмущенной ионосферы. Исследования работоспособности программы показали, что в сложных ионосферных условиях она все же может давать недостоверные отсчеты ионосферных параметров.

Авторы выражают признательность сотрудникам ФГБНУ НИРФИ и ФГБУН «ИЗМИРАН», предоставившим исходные экспериментальные ионограммы.

RESEARCH IONOSONDE "CYCLONE" OF KAZAN UNIVERSITY AND PROGRAM OF AUTOSCALING IONOGRAMS

E.Yu.Zykov, O.N.Sherstyukov, A.D.Akchurin

This paper describes an ionospheric complex «Cyclon» and automatic vertical incident ionogram processing system. Autoscaling software has been designed and tested to scale and interpretate the ionograms produced by the various ionosondes.

KEY WORDS: IONOSONDE, IONOGRAM, AUTOSCALING

ЛИТЕРАТУРА

1. Минуллин Р.Г. Цифровой ионосферный комплекс «Циклон» / Минуллин Р.Г., Шерстюков О.Н., Сапаев А.Л. и др. // Ионосферные исследования. М: 1989. № 46. С.109-115.
2. Минуллин Р.Г. Цифровой ионосферный комплекс «Циклон-9» / Минуллин Р.Г., Шерстюков О.Н., Сапаев А. и др. / Деп. ВИНТИ. 1994. № 1518-В94.
3. Akchurin A.D. The Ionospheric Complex CYCLON / Akchurin A.D., Minullin R.G., Nazarenko V.I. et al. // Ionosonde networks and stations. Proceeding of Session G6 at the XXIV General Assembly of the International Union of Radio Science (URSI) Kyoto. Japan. National Geophysical Data Center. 1995. Boulder. P.35-36.
4. Зыков Е.Ю. Автоматическая обработка ионограмм в ионосферном комплексе «Циклон-10» / Зыков Е.Ю., Минуллин Р.Г., Шерстюков О.Н. и др. // Ионосферные исследования. М. 1997. N 50. С.232-243.
5. Руководство URSI по интерпретации и обработке ионограмм. Под редакцией П.В. Медниковой - М.: Наука. 1977. с.342 с.
6. Pulinets S.A. Automating vertical ionogram collection, processing and interpretation / Pulinets S.A. // Ionosonde networks and stations. Proceeding of Session G6 at the XXIV General Assembly of the International Union of Radio Science (URSI) Kyoto. Japan. National Geophysical Data Center. 1995. Boulder. P.37-43.
7. Зыков Е.Ю., Акчурин А.Д., Сапаев А.Л., Шерстюков О.Н. Автоматическая интерпретация ионограмм вертикального зондирования // Ученые записки КГУ. 2008. Т.150. Кн.3. с.36-45
8. Галкин И.А. Программное обеспечение системы автоматической обработки ионограмм вертикального зондирования. I. Первичная обработка ионограммы / Галкин И.А. // Препринт СибИЗМИР СО АН СССР. № 20-87. Иркутск. 1987, 17 с.
9. Галкин И.А. Программное обеспечение системы автоматической обработки ионограмм вертикального зондирования. I. Интерпретация высотно-частотной характеристики / Галкин И.А. // Препринт СибИЗМИР СО АН СССР. № 22-88. Иркутск. 1988, 13 с.
10. Pezzopane M The INGV software for the automatic scaling of foF2 and MUF(3000)F2 from ionograms: A performance comparison with ARTIST 4.01 from Rome data / M. Pezzopane, C. Scotto // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, Vol. 67, № 12, August 2005., P.1054-1062.