

А. В. БОГОМАЗ, Д. В. КОТОВ, Д. А. ИСКРА

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕРКИ НОВОГО ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ РАДАРА НЕКОГЕРЕНТНОГО РАССЕЙНИЯ В РЕЖИМЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СРЕДНЕЙ ИОНОСФЕРЫ

Представлены результаты экспериментальной проверки разработанного программно-аппаратного комплекса для обработки данных харьковского радара некогерентного рассеяния в режиме зондирования ионосферы сдвоенными импульсами малой длительности и с переменным расстоянием между ними. Описаны условия эксперимента. Представлен интерфейс разработанной программы, с помощью которой были получены экспериментальные данные. Охарактеризованы полученные во время эксперимента данные и дано описание их формата. Представлен алгоритм, использовавшийся для калибровки шкалы высот. Показаны этапы обработки данных (расчёт автокорреляционных функций принятого радаром и перенесенного на видеочастоту сигнала, устранение когерентных помех от спутников и космического мусора, временное усреднение, высотное усреднение, учёт характеристики восстановления газовых разрядников антенного коммутатора радара, расчёт автокорреляционной функции шума и получение автокорреляционной функции сигнала некогерентного рассеяния, решение обратной задачи рассеяния) с результатами их выполнения. Представлено сравнение оценок параметров ионосферной плазмы, полученных с помощью нового программно-аппаратного комплекса, с оценками, полученными с помощью действующей системы обработки данных (аппаратно-программный комплекс «КЕНТАВР»), и результатами моделирования с использованием международной справочной модели ионосферы IRI-2016.

Ключевые слова: ионосфера, радар некогерентного рассеяния, аналого-цифровое преобразование, обработка данных, система обработки данных, база данных, разработка программного обеспечения.

О. В. БОГОМАЗ, Д. В. КОТОВ, Д. О. ИСКРА

РЕЗУЛЬТАТИ ПЕРЕВІРКИ НОВОГО ПРОГРАМНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСУ ДЛЯ ОБРОБКИ ДАНИХ РАДАРА НЕКОГЕРЕНТНОГО РОЗСІЯННЯ В РЕЖИМІ ДОСЛІДЖЕННЯ СЕРЕДНЬОЇ ІОНОСФЕРИ

Представлено результати експериментальної перевірки розробленого програмно-апаратного комплексу для обробки даних харківського радара некогерентного розсіяння в режимі зондування іоносфери здвоєними імпульсами малої тривалості та зі змінною відстанню між ними. Описано умови експерименту. Представлено інтерфейс розробленої програми, за допомогою якої отримано експериментальні дані. Охарактеризовано отримані під час експерименту дані та надано опис їхнього формату. Представлено алгоритм, що використовувався для калібрування шкали висот. Показано етапи обробки даних (розрахунок автокореляційних функцій прийнятого радаром та перенесеного на відеочастоту сигналу, усунення когерентних завад від супутників та космічного сміття, часове усереднення, врахування характеристики відновлення газових розрядників антенного комутатора радара, розрахунок автокореляційної функції шуму та отримання автокореляційної функції сигналу некогерентного розсіяння, розв'язання оберненої задачі розсіяння) з результатами їх виконання. Представлено порівняння оцінок параметрів іоносферної плазми, отриманих за допомогою нового програмно-апаратного комплексу, з оцінками, отриманими за допомогою діючої системи обробки даних (апаратно-програмний комплекс «КЕНТАВР»), та результатами моделювання з використанням міжнародної довідкової моделі іоносфери IRI-2016.

Ключові слова: іоносфера, радар некогерентного розсіяння, аналого-цифрове перетворення, обробка даних, система обробки даних, база даних, розробка програмного забезпечення.

O. V. BOGOMAZ, D. V. KOTOV, D. O. ISKRA

RESULTS OF TESTING NEW HARDWARE AND SOFTWARE SYSTEM FOR PROCESSING DATA OBTAINED BY INCOHERENT SCATTER RADAR OPERATING IN THE MODE FOR MIDDLE IONOSPHERE RESEARCH

The results of the experimental testing of a new data processing system for Kharkiv incoherent scatter radar are presented. Experimental conditions are described. Graphical user interface of the developed program for experimental data acquisition is described. The data obtained during the experiment are characterized and the description of their format is given. An algorithm for height scale calibration is presented. The stages of data processing (calculating autocorrelation function of the received signal; noise removing; temporal averaging; taking into account a recovery characteristic of the antenna switcher; calculating autocorrelation functions of noise and incoherent scatter signal; inverse problem solving) with the results of their implementation are shown. A comparison of the estimates of ionosphere plasma parameters obtained using the new data processing system with the estimates obtained using the current one ("KENTAVR") and the simulation results using the IRI-2016 model is presented.

Keywords: ionosphere, incoherent scatter radar, analog-to-digital conversion, data processing, data processing system, database, software development.

Введение. Для исследования средней ионосферы (т.е. на высотах вблизи максимума области F2) на харьковском радаре применяется режим зондирования сдвоенными импульсами длительностью 135 мкс с изменяющимся расстоянием между ними (так называемый «4-й режим»). Это позволяет улучшить высотное разрешение (до 20 км) в сравнении с режимами зондирования простыми импульсами большой длительности (795 в 1-м режиме или 663 мкс в 12-м режиме) [1–3].

Измерения в режиме зондирования сдвоенными импульсами проводились в период с 1999 по 2004 г. [4], а в 2017 г. была начата работа по разработке нового программно-аппаратного комплекса для обработки данных, получаемых при работе радара в этом режиме. Необходимость разработки связана с тем, что аппаратное и программное обеспечение системы обработки данных харьковского радара НР, которая используется во время его работы в режиме зондирования короткими

© А. В. Богомаз, Д. В. Котов, Д. А. Искра, 2018

Вісник Національного технічного університету «ХПІ».
Серія: Радіофізика та іоносфера, № 43 (1319) 2018

импульсами, были разработаны ещё в середине 1990-х годов [5]. Это означает, что, во-первых, из-за небольшой вычислительной мощности компьютерной системы необходимо искусственно занижать точность вычислений для улучшения временных показателей (система должна работать в режиме реального времени). Во-вторых, даже несмотря на улучшение временных характеристик, необходимо выполнять горизонтальное масштабирование системы (используется 3 компьютера, соединённых в одну сеть: первый компьютер обрабатывает данные для получения температуры и ионного состава плазмы, второй – для получения вертикальной составляющей скорости движения плазмы, третий компьютер выступает в роли сервера, на котором происходит накопление данных). И наконец, с длительным сроком эксплуатации системы связано увеличение количества аппаратных сбоев.

В ходе разработки нового программно-аппаратного комплекса для обработки данных в 4-м режиме в качестве устройства сбора данных был выбран модуль аналого-цифрового преобразования (АЦП) E20-10 [6], а также было спроектировано, изготовлено и протестировано устройство, имитирующее сигналы синхронизации системы обработки данных с другими системами радара [7]. Применение этого устройства позволило отладить программное обеспечение для сбора данных.

Первая проверка работы программно-аппаратного комплекса в составе харьковского радара НР была проведена 26.12.2017 г. [8].

Целью этой работы является представление результатов обработки данных, полученных во время эксперимента, и методик, с помощью которых производилась обработка.

Условия эксперимента. Эксперимент начался в 09:31 по восточно-европейскому времени (ЕЕТ = UT + 2) – примерно через 30 мин после окончания плановых (близких ко дню зимнего солнцестояния) измерений параметров ионосферы в 12-м режиме работы радара (рис. 1). Значения геомагнитного индекса K_p , усреднённого на интервале 3 ч, во время эксперимента и в предыдущий день не превышали 3 [9]. Конфигурация радиоприёмного устройства после переключения радара с 12-го режима осталась без изменений. Ширина полосы пропускания приёмного тракта, определяемая в основном фильтрами нижних частот (ФНЧ), установленными после синхронных детекторов, $\Delta f \approx 9,5$ кГц. Эксперимент продолжался до 10:32 ЕЕТ.

Аппаратное и программное обеспечение. Аппаратная составляющая комплекса основана на модуле АЦП E20-10, подключаемому к высокопроизводительному персональному компьютеру по шине USB. Модуль имеет 4 коммутируемых аналоговых входа, из которых в данной конфигурации задействовано 3 – для синфазной и квадратурной компонент принятого сигнала, поступающих с выходов синхронного

детектора, и цифрового сигнала R_0 [7]. Сигнал R_0 – напряжение уровня логической «1» (ТТЛ), присутствующее в течение всей радиолокационной развёртки при зондировании ионосферы одиночным импульсом, и напряжение уровня логического «0» во время зондирования ионосферы парными импульсами.

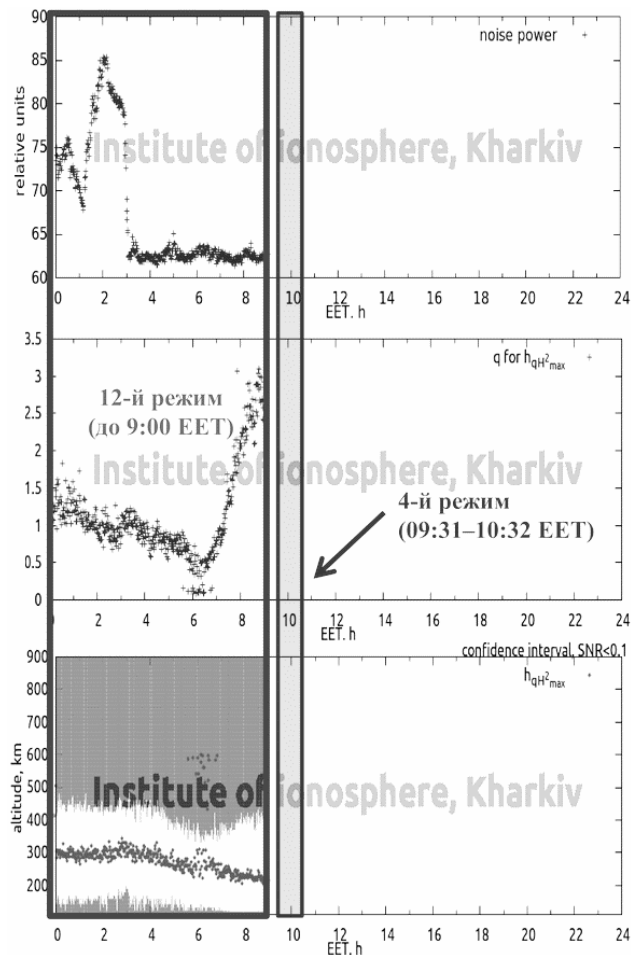


Рис. 1. Время проведения эксперимента по проверке нового программно-аппаратного комплекса для обработки данных при работе харьковского радара НР в 4-м режиме и помеховая обстановка до эксперимента (при работе радара в 12-м режиме). На верхней панели показана временная зависимость мощности космических и собственных шумов, которые присутствуют в данных, на средней – отношение сигнал/шум q на высоте максимума сечения рассеяния qh^2 , на нижней – высота максимума сечения рассеяния и область высот, где данным доверять нельзя из-за малого отношения сигнал/шум ($q < 0.1$).

Для обеспечения функции сбора данных была разработана соответствующая программа. Внешний вид её интерфейса показан на рис. 2.

Главное окно программы (рис. 3) включает следующие элементы (сверху вниз): текстовое поле, в котором отображается служебная информация о состоянии модуля E20-10, три текстовых поля, в которые пользователем вводятся параметры записи радиолокационных развёрток (основной параметр – количество наборов из 7 развёрток, записываемых в

файл; рекомендуется либо 209, что при частоте следования зондирующих импульсов 24.4 Гц соответствует 1-минутному сеансу сбора данных, либо 314, что соответствует сеансу продолжительностью 1.5 мин, индикатор выполнения (progressbar), показывающий, какая часть данных в текущем сеансе собрана, флажок (checkbox), открывающий и закрывающий дополнительное окно с визуализацией сигналов, а также кнопку, нажатие на которую запускает или останавливает (в зависимости от текущего состояния программы) сбор данных. Запуск потока программы, отвечающего за сбор данных, может осуществляться как непосредственно после нажатия на кнопку «Старт» (при этом заголовок кнопки меняется на «Стоп»), так и с начала следующей минуты.

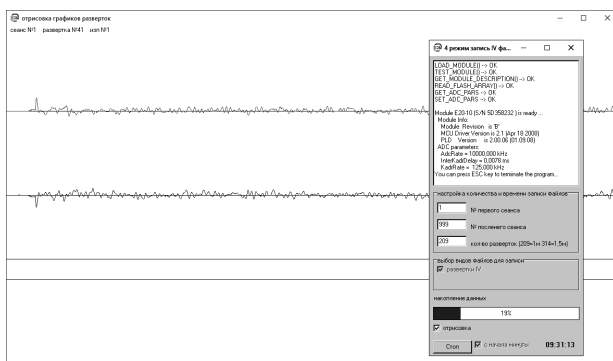


Рис. 2. Интерфейс разработанной программы сбора данных, входящая в состав программно-аппаратного комплекса для обработки данных радара негеографического рассеяния в режиме исследования средней ионосферы

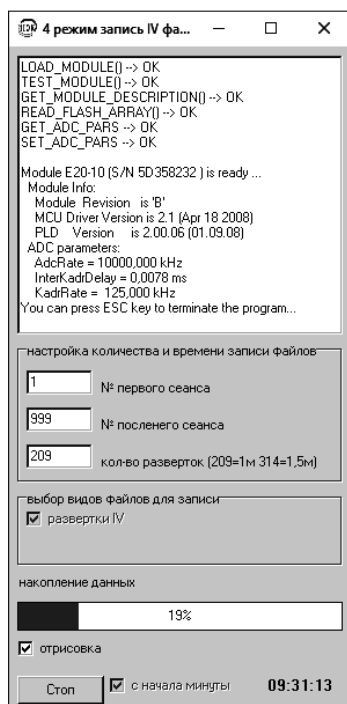


Рис. 3. Главное окно программы сбора данных

Разработанная для 4-го режима работы радара программа сбора данных поддерживает один формат выходных файлов (в отличие от программы для 12-го режима). Структура файла показана на рис. 4. Файл содержит заголовок с информацией о сеансе, за которым следуют данные, представляющие оцифрованные мгновенные значения сигналов синфазной и квадратурной компоненты принятого и перенесенного на видеочастоту сигнала.

После анализа оцифрованного сигнала R_0 , поданного на третий вход модуля АЦП, радиолокационные развёртки, во время которых излучается одиночный зондирующий импульс (для получения мощности сигнала), помечаются маркером «1», остальные развёртки – маркером «0».

Исходные данные для анализа. Во время эксперимента 26.12.2017 г. работали следующие системы обработки:

1. Система обработки на базе модуля E20-10, работающая под управлением новой программы обработки.

2. Аппаратно-программный комплекс (АПК) «КЕНТАВР», функционирующий в составе харьковского радара НР с 1996 г.

В результате эксперимента было получено 62 файла с данными, сформированные новой программой обработки. Размер каждого файла – около 14 Мбайт, суммарный объём данных – 865 Мбайт. Интервал дискретизации – 8 мкс (что соответствует шагу по высоте около 1.2 км), количество точек в развёртке – 2500 (что соответствует максимальной дальности около 3000 км).

С помощью программного обеспечения АПК «КЕНТАВР» было получено 38 файлов, содержащих усреднённые в течение 1.5 мин корреляционные функции (КФ) принятого с 360 высотных участков сигнала, и 38 файлов с результатами их экспресс-обработки (суммарный объём данных – 0.8 и 1.1 Мбайт соответственно). Детальное сравнение исходных данных представлено в табл. 1.

Анализ данных. Данные, полученные с помощью АПК «КЕНТАВР», были обработаны в одноименном пакете программ. Обработка заключалась в фильтрации когерентных помех, получению КФ НР сигнала и временному их усреднению на интервале 30 мин, решению по автокорреляционным функциям (АКФ) НР сигнала обратной задачи рассеяния. Была выполнена оценка таких параметров ионосферной плазмы, как температуры ионов и электронов, относительное содержание ионов различных сортов (атомарного кислорода O^+ , атомарного водорода H^+ , гелия He^+ и тяжёлых молекулярных ионов O_2^+ и NO^+ , неразличимых в методе НР из-за близких значений их масс и обозначаемых как M^+), вертикальная составляющая скорости движения плазмы. Таким образом, получены 2 высотных профиля параметров (для моментов времени 10:00 ЕЕТ и 10:30 ЕЕТ), имеющих хорошее согласие с результатами

моделирования, проведенного с использованием IRI-2016 [10].
международной справочной модели ионосферы

Заголовок	
01 00 00 00 4 байта	Версия (1)
Г Г Г Г - М М - Д Д 20(пробел) Ч Ч : м м : С С 00 20 байт	Дата (в формате ASCII)
D1 00 00 00 4 байта	Количество развёрток N_d (209 (209*7= 1463))
C4 09 00 00 4 байта	Количество точек в развёртке N_h (2500)
08 00 00 00 4 байта	Интервал дискретизации в мкс (8 (7.8 мкс + время на коммутацию каналов))
00 00 4 байта	Зарезервировано 44 байта
00 00 44 байта	
Размер заголовка: 4+20+4+4+4+44 = 80 байт	
Данные	
1 A ₁ [1] A ₁ [2] A ₁ [N _h]	B ₁ [1] B ₁ [2] B ₁ [N _h]
0 2500 * 2 байта	
0 A ₂ [1] A ₂ [2] A ₂ [N _h]	B ₂ [1] B ₂ [2] B ₂ [N _h]
.....
0 A _{N_d} [1] A _{N_d} [2] A _{N_d} [N _h]	B _{N_d} [1] B _{N_d} [2] B _{N_d} [N _h]
Размер данных: (1*7*209)+(2*2*2500*7*209)=1463 + 14630000 = 14 631 463 байта	
Размер файла: 80 + 14631463 = 14 631 543 байта	
Имя файла: ГГГ-ММ-ДД_ЧЧ-мм-СС.ИВ	

Рис. 4. Формат файла для записи и хранения радиолокационных развёрток, полученных во время работы харьковского радара в режиме сдвоенных импульсов (4-й режим)

Таблица 1. Сравнение исходных данных, полученных во время эксперимента, проведенного 26.12.2017 г. на харьковском радаре НР

Критерий сравнения	Старая программа первичной обработки данных («Кентавр»)	Результаты экспресс-обработки данных, полученных с помощью старой программы первичной обработки данных	Новая программа первичной обработки данных
Вид информации	КФ принятого сигнала	КФ сигнала НР, АКФ шума, оценки параметров ионосферы	Мгновенные значения принятого сигнала
Шаг по высоте	9.8 км	9.8 км	1.2 км
Количество высотных участков	360	98	2500
Длительность сеанса	90 с	90 с	60 с
Размер одного файла	21.1 кбайт	29.6 кбайт	14.3 Мбайт
Количество файлов	38	38	62
Общий объём данных	0.8 Мбайт	1.1 Мбайт	865.1 Мбайт

Обработка данных, полученных с помощью новой системы, производилась путём внедрения поддержки формата файлов и модифицирования алгоритмов, реализованных в разрабатываемой на языке программирования *Java* программе UPRISE2 [11]. Для получения конечного результата – оценок параметров ионосферной плазмы – необходимо [12–14]:

- рассчитать КФ принятого и перенесенного на видеочастоту сигнала;
- выполнить фильтрацию присутствующих в данных помех;
- произвести временное и высотное усреднение КФ;
- рассчитать КФ НР сигнала;
- учесть аппаратные особенности радара;
- решить обратную задачу рассеяния.

Кроме этого необходимо выполнить калибровку шкалы высот, т.е. в формуле

$$h = h_0 + \Delta h \cdot i_h, \quad (1)$$

где h – высота (в км), h_0 – начальная высота (в км), соответствующая нулевому высотному участку, Δh – шаг по высоте (в км), связанный с частотой дискретизации сигнала и особенностями записи данных в файл, i_h – номер высотного участка, необходимо определить константу h_0 . Константа Δh в данном случае однозначно определяется частотой дискретизации $f_d = 8$ мкс и равна 1.2 км.

Для определения h_0 был проведен анализ взаимного расположения во времени сигнала синхронизации системы обработки данных и сигнала, содержащего импульсы запуска передатчика, в ходе

которого была оценена задержка между ними. Её величина составила около 640 мкс, что с учётом длительности импульса позволила получить достаточно точную оценку h_0 .

Дополнительно было произведено уточнение h_0 по методике, описанной в [15]. Она заключается в следующем. Выбирается космический объект, находящийся на низкой околоземной орбите. Зная параметры орбиты, можно рассчитать время и высоту пролёта этого объекта над радаром. Таким образом, попадая в диаграмму направленности радара, объект отражает зондирующие сигналы, формируя на радиолокационной развёртке отклик длительностью примерно равной длительности зондирующего импульса. Т.к. высота объекта известна, то она приписывается середине импульса когерентного отражения (в методе НР цель – распределённая в пространстве, занимаемом излучаемым импульсом).

К сожалению, пролёта над харьковским радаром НР Международной космической станции во время эксперимента не было (а именно по ней производилась калибровка высоты в 12-м режиме), был произведен поиск других объектов.

Из каталога спутников и космического мусора [16] с помощью программы на языке *Python*

были отфильтрованы низкоорбитальные спутники, находящиеся на орбите во время эксперимента. Всего было выбрано 3086 объектов. С помощью сервиса [17] были получены параметры их орбит для интервала времени 07:30–08:30 UT (в формате TLE), а затем с помощью программы *Orbitron* [18] рассчитаны моменты пролётов объектов над антенной радара.

Из всех пролётов были выбраны такие, которые могли вызвать когерентное отражение от объекта во время попадания его в главный лепесток диаграммы направленности (ДН). С учётом того, что ширина ДН антенны НДА-100 по половинной мощности $2\theta_{0.5P}$ составляет $1.1^\circ-1.2^\circ$ [19], были отфильтрованы такие пролёты объектов, когда угол места был не менее 89.4° . Результаты сведены в табл. 2. Таким образом, удалось идентифицировать 5 объектов (рис. 5). Зафиксированное время пролёта совпадало с рассчитанным, а найденные с помощью программы *Orbitron* высоты позволили скорректировать значение константы h_0 . Формула (1) при этом приобретает вид

$$h = -120 + 1.2 \cdot i_h.$$

Таблица 2. Параметры пролётов идентифицированных спутников над антенной НДА-100 харьковского радара НР в период 07:30–08:30 UT 26.12.2017 г.

Время пролёта (UT/ЕЕТ)	Идентификатор объекта (согласно каталогу NORAD)	Название объекта	Эффективная площадь рассеяния, м ²	Угол места, град.	Дистанция, км
07:36/09:36	727	THOR AGENA D R/B	7.525	89.5	915
07:46/09:46	21784	COSMOS 2170	1.113	89.6	1418
07:46/09:46	25634	ARGOS	7.4694	89.5	838
07:54/09:54	26385	TZINGHUA 1	0.4926	89.7	683
08:27/10:27	8709	UME 1 (ISS 1)	1.3849	89.4	1005

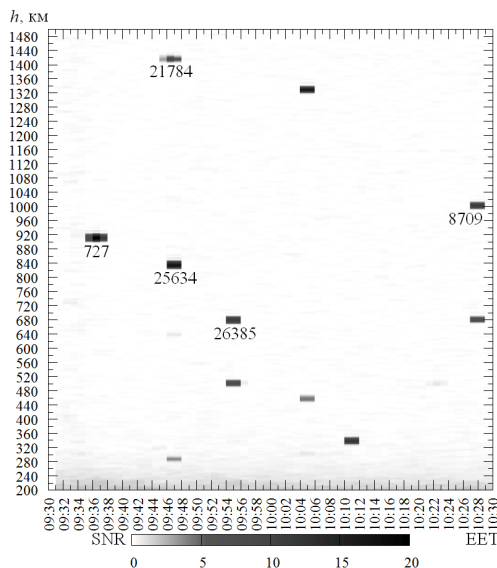


Рис. 5. Высотно-временная зависимость отношения сигнал/шум (signal-to-noiseratio, SNR) с когерентными отражениями от космических объектов, 5 из которых были идентифицированы

Расчёт КФ принятого с высоты h и перенесенного на видеочастоту сигнала можно описать формулой

$$R(h, \tau) = \sum_{i=1}^N x(i_h)x(h - c\tau), \quad (2)$$

где x – мгновенное значение сигнала, τ – задержка КФ, c – скорость света, N – количество радиолокационных развёрток в сеансе измерений.

С учётом интервала дискретизации $\Delta t = 8$ мкс и дискреты значений задержек $\Delta \tau = 40$ мкс, для которых рассчитывается КФ, формула (2) приобретает вид:

$$R(i_h, i_\tau) = \sum_{i=1}^N x(i_h)x(i_h - 5i_\tau),$$

где $i_\tau \in \{0, 7, 8, 9, 10, 11, 12\}$ – индекс задержки КФ, $i_h \in [i_\tau, 2500)$ – индекс высотного участка.

При использовании синфазной и квадратурной составляющих сигнала (x_I и x_Q соответственно) и учёте постоянной составляющей в каждом из выходов

синхронного детектора, КФ рассчитывается по формуле:

$$R(i_h, i_\tau) = \sum_{i=1}^N x_I(i_h) x_I(i_h - 5i_\tau) + \sum_{i=1}^N x_Q(i_h) x_Q(i_h - 5i_\tau) - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_I(i_h) \sum_{i=1}^N x_I(i_h - 5i_\tau) - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_Q(i_h) \sum_{i=1}^N x_Q(i_h - 5i_\tau). \quad (3)$$

Полученные по формуле (3) значения КФ принятого сигнала программа UPRISE2 помещает в проект, который представляет собой базу данных (БД). В качестве системы управления базами данных используется *SQLite* [20]. Результаты каждого этапа обработки заносятся в отдельные таблицы, имеющие одинаковую структуру:

```
CREATE TABLE `step1` (
  `id`      INTEGER PRIMARY KEY
            AUTOINCREMENT,
  `time`   DATETIME,
  `alt`    INT,
  `lag`    INT,
  `value`  DOUBLE
);
```

В программе реализованы запросы для получения КФ сигнала на заданной высоте и указанный момент времени t_c $R(t_c = \text{const}, i_h = \text{const}, i_\tau = \text{var})$, высотного профиля КФ для заданной задержки времени в указанный момент времени $R(t_c = \text{const}, i_h = \text{var}, i_\tau = \text{const})$, временной зависимости КФ для заданной задержки на определённой высоте $R(t_c = \text{var}, i_h = \text{const}, i_\tau = \text{const})$.

На каждой из высот i_h для каждой задержки i_τ поочередно из БД запрашивались временные зависимости значений КФ, к которым затем применялись процедура идентификации когерентных помех, основанная на использовании скользящего окна с адаптивным расчётом порога на каждом шаге, и процедура усреднения на заданном временном интервале. Алгоритмы идентификации помех и временного усреднения данных описаны в [14]. Примеры выполнения этих процедур показаны на рис. 6. Временные зависимости мощности принятого сигнала $P(t_c, i_h) = R(t_c, i_h, i_\tau = 0)$ на высотах 300 км и 840 км после устранения когерентных помех (например, на высоте 840 км в 09:46 ЕЕТ зафиксирован пролёт спутника ARGOS) данные были усреднены на интервале 30 мин.

Следующими этапами обработки были:

– высотное усреднение КФ на интервале, занимаемом коррелирующим объёмом плазмы, который в 4-м режиме работы радара практически полностью определяется длительностью зондирующего импульса;

– вычитание шума, КФ которого определяется как КФ сигнала, принятого с высот, где мощность полезного, НР, сигнала настолько мала, что ею можно пренебречь;

– учёт характеристики восстановления газовых разрядников антенного коммутатора, который после окончания излучения зондирующего импульса переключает антенну НДА-100 с передатчика на приёмник.

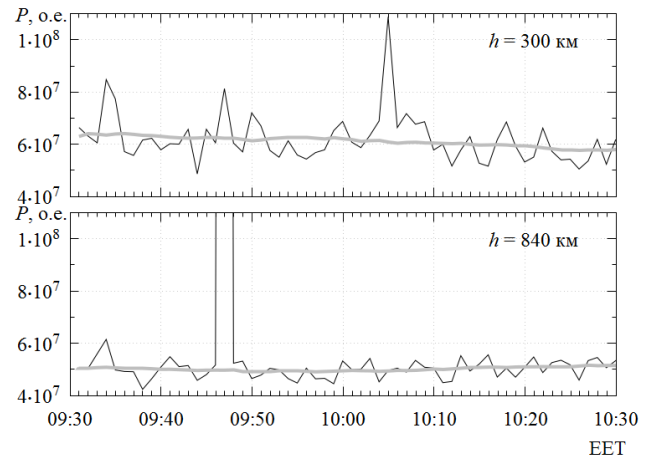


Рис. 6. Временные зависимости мощности принятого с высот 300 км и 840 км сигнала (тонкие тёмные линии), а также результаты их фильтрации от когерентных помех и усреднения (светлые линии) в относительных единицах (о. е.)

КФ шума рассчитывается в диапазоне высот 2160–2520 км (индексы высот $i_{H_{\min}} = 1900$, $i_{H_{\max}} = 2200$) по формуле:

$$R_N(i_\tau) = \frac{1}{i_{H_{\max}} - i_{H_{\min}}} \sum_{i_h=i_{H_{\min}}}^{i_{H_{\max}}-1} R(i_\tau, i_h).$$

Полученная в 4-м режиме АКФ шума хорошо согласуется с АКФ шума, полученной в 12-м режиме работы радара (рис. 7).

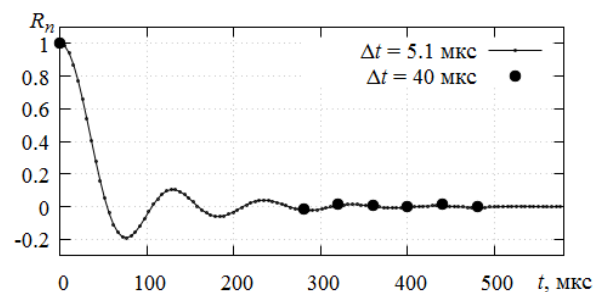


Рис. 7. Нормированные АКФ шума, полученные в 12-м и 4-м режимах работы харьковского радара НР (ФНЧ использовались одни и те же)

Так как в 4-м режиме между парой импульсов, излучаемых на несущей частоте $f_0 = 158$ МГц, излучается сигнал на сдвинутой частоте $f_1 = f_0 + 0.1$ МГц [3], можно считать реакцию разрядников на излучаемый сигнал такой же, как и при работе в 12-м режиме. Поэтому при учёте аппаратных особенностей радара во время обработки данных эксперимента, проведенного 26.12.2017 г., использовалась характеристика восстановления разрядников антенного коммутатора r , измеренная во время эксперимента 29.12.2014 г., который проводился в 12-м режиме работы радара. Характеристика была интерполирована с шагом 8 мкс (рис. 8), а затем на участке $i_h \in (187, 600)$ аппроксимирована полиномом 6-й степени:

$$r(i_h) = \sum_{j=0}^6 a_j i_h^j,$$

где $a_0 = -4.7499283$, $a_1 = 1.8853600 \cdot 10^{-2}$,
 $a_2 = 2.1625741 \cdot 10^{-4}$, $a_3 = -1.592397 \cdot 10^{-6}$,
 $a_4 = 4.2045693 \cdot 10^{-9}$, $a_5 = -5.0407075 \cdot 10^{-12}$,
 $a_6 = 2.306279 \cdot 10^{-15}$.

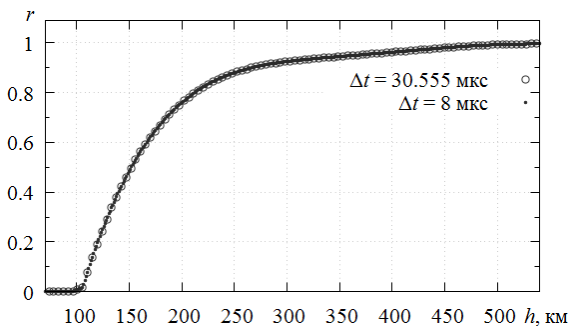


Рис. 8. Характеристика восстановления разрядников антенного коммутатора

Абсолютная погрешность при аппроксимации $D = r_c - r$ (где r_c и r – аппроксимированная и измеренная характеристики восстановления разрядников соответственно) показана на рис. 9.

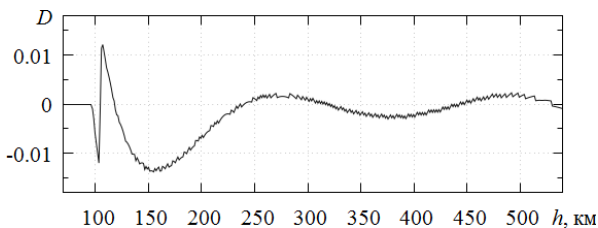


Рис. 9. Абсолютная погрешность при аппроксимации характеристики восстановления разрядников антенного коммутатора харьковского радара НР

Учёт характеристики восстановления r осуществляется по формуле:

$$R^*(i_\tau, i_h) = \frac{R(i_\tau, i_h)}{\sqrt{r(i_h)r(i_h - i_\tau)}}.$$

На рис. 10 показаны высотные профили мощности принятого сигнала после высотного усреднения по 5 точкам и учёта характеристики восстановления разрядников (тёмная линия) и НР сигнала, т.е. после вычитания мощности шума (светлая линия).

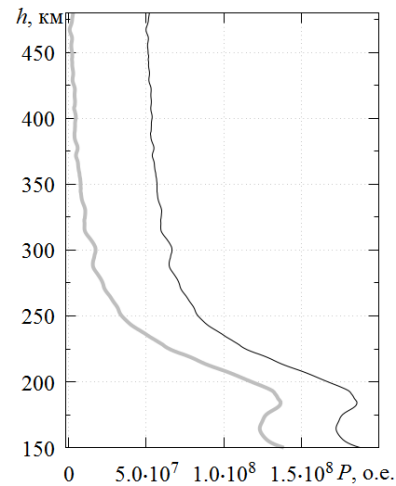


Рис. 10. Высотные профили мощности принятого сигнала до (тонкая тёмная линия) и после (светлая линия) вычитания шума

АКФ НР сигнала, принятого с разных высот, показаны на рис. 11. Они могут использоваться для решения обратной задачи рассеяния, т.е. оценки параметров ионосферной плазмы [11, 21].

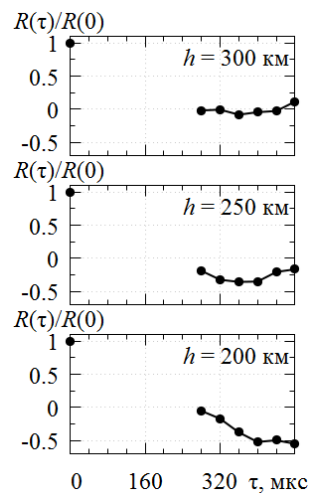


Рис. 11. Нормированные АКФ НР сигнала, принятого с высот 200, 250 и 300 км

Был реализован поиск температур среди решений в диапазоне 500–3000 К с шагом 10 К для высоты 250 км. Плазма считалась однокомпонентной (относительное содержание ионов O^+ – 100 %).

Согласно модели IRI-2016 относительное содержание ионов атомарного кислорода в 09:30 составляло 95.2 %, по результатам обработки данных с помощью программы «КЕНТАВР» – 100 %. Результат решения обратной задачи рассеяния показан на рис. 12.

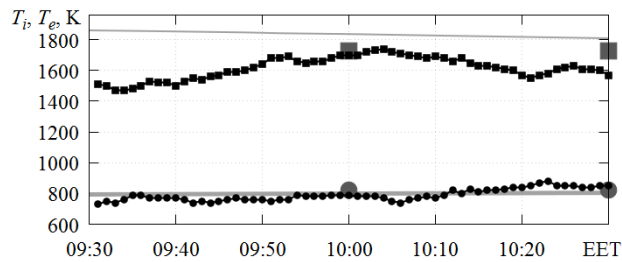


Рис. 12. Температуры ионов T_i и электронов T_e ($T_e > T_i$): согласно модели IRI-2016 (светлые линии), полученные с помощью программы АПК «КЕНТАВР» (большие круги и квадраты) и полученные с помощью нового программно-аппаратного комплекса и программы UPRISE2 (маленькие круги и квадраты)

Выводы. Проведенный 26.12.2017 г. эксперимент на харьковском радаре НР позволил проверить работу нового программно-аппаратного комплекса для обработки данных для режима

Список литературы

1. Рогожкин Е. В. *Зондирующие сигналы для исследования ионосферы методом некогерентного рассеяния*: монография / Е. В. Рогожкин, В. А. Пуляев, В. Н. Лысенко. – Х: НТУ «ХПИ», 2008. – 256 с.
2. Головин В. И. Наблюдения ионосферы с помощью метода некогерентного рассеяния. Сообщение 2. Аппаратурные и методические особенности / В. И. Головин, Е. В. Рогожкин, В. И. Таран, С. В. Черняев // *Вестник Харьковского политехнического института. Исследование ионосферы методом некогерентного рассеяния*. – 1979. – №155. – С. 12–22.
3. Domin I. F. Kharkiv incoherent scatter facility / I. F. Domin, Ya. M. Cherpurnyy, L. Ya. Emelyanov, S. V. Chernyaev, A. F. Kononenko, D. V. Kotov, O. V. Bogomaz, D. A. Iskra // *Bulletin of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute". Series: Radiophysics and Ionosphere*. – 2014. – № 47 (1089). – P. 28–42.
4. Сюсюк М. Н. Особенности исследования средней ионосферы методом некогерентного рассеяния / М. Н. Сюсюк // *Вестник Национального технического университета «Харьковский политехнический институт»*. – 2013. – №33 (1066) – С. 62–65.
5. Цуркан А. В. Двухимпульсный режим радара некогерентного рассеяния / А. В. Цуркан // *Вестник Харьковского государственного политехнического университета*. – Харьков. – 1999. – Вып. 31. – С. 120–123.
6. Искра Д. А. Повышение точности определения автокорреляционных функций сигнала некогерентного рассеяния / Д. А. Искра // *Вестник Национального технического университета «Харьковский политехнический институт»*. – №33 (1066) – 2013. – С. 34–37.
7. Богомаз А. В. Синхронизация системы обработки данных радара некогерентного рассеяния в режиме исследования средней ионосферы / А. В. Богомаз, Д. А. Искра, А. Ф. Кононенко // *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. *Радіофізика та іоносфера*. – 2017. – № 47 (1268). – С. 16–19.
8. Богомаз А. В. Проверка новой программы обработки данных харьковского радара некогерентного рассеяния в режиме исследования средней ионосферы / А. В. Богомаз, Д. А. Искра, А. Ф. Кононенко // *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей XXVI міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2018, 16-18 травня 2018р.*: у 4 ч. Ч. III. / за ред. проф. Сокола Є.І. – Харків: НТУ «ХПІ». – С. 304.
9. [ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/indices/old_indices/2017_DGD.txt](http://ftp.swpc.noaa.gov/pub/indices/old_indices/2017_DGD.txt)
10. Bilitza D. International Reference Ionosphere 2016: From ionospheric climate to real-time weather predictions / D. Bilitza, D. Altadill, V. Truhlik, V. Shubin, I. Galkin, B. Reinisch, X. Huang // *Space Weather*, N 15. – P. 418–429. – 2017, doi:10.1002/2016SW001593.
11. Bogomaz O. Advances in software for analysis of Kharkiv incoherent scatter radar data / O. Bogomaz, D. Kotov, S. Panasenko, L. Emelyanov // *2017 IEEE International conference of information-telecommunication technologies and radio electronics (UkrMiCo'2017) / Materials of scientific and technical conference*. – Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2017 – P. 531–535.
12. Богомаз А. В. Этапы обработки данных радара некогерентного рассеяния / А. В. Богомаз // *Конференція молодих учених «Дистанційне радіозондування іоносфери (ІОН-2012)» (Харьков, Україна, 18 – 20 квітня 2012 р.)*. – Сборник тезисов. – 2012. – С. 7.
13. Богомаз А. В. Пакет программ нового поколения для обработки данных радаров некогерентного рассеяния Unified Processing of the Results of Incoherent Scatter Experiments (UPRISE) / А. В. Богомаз, Д. В. Котов // *Вестник Национального технического университета «Харьковский политехнический институт»*. Серия: «Радиофизика и ионосфера». – 2013. – № 28 (1001). – С. 29–37.
14. Богомаз О. В. *Проектування програм обробки даних радара некогерентного розсіяння на мові програмування С. Методичні вказівки до лабораторних робіт з курсу «Цифрова обробка сигналів» для студентів спеціальностей 7.04020402, 8.04020402 «Радіофізика та електроніка» та з курсу «Проектування програм обробки радіофізичних даних» для студентів спеціальностей 7.05010203, 8.05010203 «Спеціалізовані комп'ютерні системи»* / уклад. О. В. Богомаз, Д. В. Котов, С. В. Панасенко. – Харків: НТУ «ХПІ», 2015. – 36 с.
15. Bogomaz O. V. A library of routines for incoherent scatter radar data processing / O. V. Bogomaz, D. V. Kotov // *Bulletin of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"*.

- Series: *Radiophysics and Ionosphere*. – 2014. – № 47 (1089). – P. 10–14.
16. <http://planet4589.org/space/log/satcat.txt>
17. <http://celestrak.com/NORAD/archives/request.php>
18. <http://www.stoff.pl/>
19. Чепурный Я. Н. Определение характеристик антенны радара некогерентного рассеяния по отражениям от каталогизированных техногенных космических объектов / Я. Н. Чепурный, Л. Я. Емельянов, Д. А. Искра // *Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб.* – 2014. – Вып. 178. – С. 75–79.
20. <https://www.sqlite.org/index.html>
21. Пуляев В. О. *Обчислювальні процедури при аналізі некогерентного розсіяння в іоносферній плазмі*: монографія / В. О. Пуляев, С. В. Рогожкін, О. В. Богомаз. – Х: Видавництво НТУ «ХПІ», 2014. – 264 с.
- 2018r.: u 4 ch. Ch. III. / za red. prof. Sokola Ye.I. – Kharkiv: NTU «KhPI». – S. 304.
9. ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/indices/old_indices/2017_DGD.txt
10. Bilitza D. International Reference Ionosphere 2016: From ionospheric climate to real-time weather predictions / D. Bilitza, D. Altadill, V. Truhlik, V. Shubin, I. Galkin, B. Reinisch, X. Huang // *Space Weather*, N 15. – P. 418–429. – 2017, doi:10.1002/2016SW001593.
11. Bogomaz O. Advances in software for analysis of Kharkiv incoherent scatter radar data / O. Bogomaz, D. Kotov, S. Panasenko, L. Emelyanov // 2017 IEEE International conference of information-telecommunication technologies and radio electronics (UkrMiCo'2017) / Materials of scientific and technical conference. – Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2017. – P. 531–535.
12. Bogomaz A. V. Jetapy obrabotki danykh radaru nekogerentnogo rassejanija / A. V. Bogomaz // *Konferencija molodyh uchjonyh «Distancionnoe radiozondirovanie ionosfery (ION-2012)» (Har'kov, Ukraina, 18 – 20 aprelja 2012 g.)*. – Sbornik tezisov. – 2012. – S. 7.
13. Bogomaz A. V. Paket program novogo pokolenija dlja obrabotki danykh radarov nekogerentnogo rassejanija Unified Processing of the Results of Incoherent Scatter Experiments (UPRISE) / A. V. Bogomaz, D. V. Kotov // *Vestnik Nacional'nogo tehničeskogo universiteta «Har'kovskij politehničeskij institut». Serija: «Radiofizika i ionosfera»*. – 2013. – № 28 (1001). – S. 29–37.
14. Bohomaz O. V. *Proektuvannia prohram obrobky danykh radaru nekoherentnoho rozsiiannia na movi prohramuvannia C. Metodnychni vkazivky do laboratornykh robot z kursu «Tsyfrova obrobka syhnaliv» dlja studentiv spetsialnosti 7.04020402, 8.04020402 «Radiofizyka ta elektronika» ta z kursu «Proektuvannia prohram obrobky radiofizyčnykh danykh» dlja studentiv spetsialnosti 7.05010203, 8.05010203 «Spetsializovani komp'uterni systemy»* / uklad. O. V. Bohomaz, D. V. Kotov, S. V. Panasenko. – Kharkiv : NTU «KhPI», 2015. – 36 s.
15. Bogomaz O. V. A library of routines for incoherent scatter radar data processing / O. V. Bogomaz, D. V. Kotov // *Bulletin of the National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»*. Series: *Radiophysics and Ionosphere*. – 2014. – № 47 (1089). – P. 10–14.
16. <http://planet4589.org/space/log/satcat.txt>
17. <http://celestrak.com/NORAD/archives/request.php>
18. <http://www.stoff.pl/>
19. Чепурный Я. Н. Определение характеристик антенны радара некогерентного рассеяния по отражениям от каталогизированных техногенных космических объектов / Я. Н. Чепурный, Л. Я. Емельянов, Д. А. Искра // *Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб.* – 2014. – Вып. 178. – С. 75–79.
20. <https://www.sqlite.org/index.html>
21. Пуляев В. О. *Обчислювальні процедури при аналізі некогерентного розсіяння в іоносферній плазмі*: монографія / В. О. Пуляев, Ye. V. Rohozhkin, O. V. Bohomaz. – Kharkiv : Vydavnytstvo NTU «KhPI», 2014. – 264 s.

Поступила (received) 07.12.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Богомаз Олександр Вікторович (Bogomaz Oleksandr Viktorovych) – кандидат технічних наук, Інститут іоносфери, старший науковий співробітник; м. Харків, України; ORCID: 0000-0001-6824-2346; e-mail: o.v.bogomaz1985@gmail.com

Котов Дмитро Володимирович (Kotov Dmytro Volodymyrovych) – кандидат фізико-математичних наук, доцент, Інститут іоносфери, старший науковий співробітник; м. Харків, України; ORCID: 0000-0003-0506-6466; e-mail: dmitrykotoff@gmail.com

Искра Дмитро Олександрович (Iskra Dmytro Oleksandrovych) – Інститут іоносфери, молодший науковий співробітник; м. Харків, України; e-mail: iskradmitry@gmail.com