

УДК 621.371:551.510.535+621.317.7:621.391

## МОДЕРНИЗИРОВАННЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ПУНКТ РАДИОФИЗИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ ХНУ имени В.Н. КАРАЗИНА

**К.П. Гармаш, С.Г. Леус, В.А. Поднос, С.Н. Похилько, О.Ф. Тырнов, А.М. Цымбал,  
Л.Ф. Черногор**

*Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, Украина, 61077, Харьков, пл. Свободы, 4*  
Поступила в редакцию 10 ноября 2010 г.

Приведено описание и характеристики модернизированных программно-аппаратных комплексов, которые размещены в выносном пункте (с. Граково) радиофизической обсерватории ХНУ имени В.Н. Каразина и используются для мониторинга геокосмической среды в диапазонах геомагнитных пульсаций, а также гекто- и декаметровых радиоволн. Продемонстрировано хорошее согласие экспериментальных данных, регистрируемых комплексами, с наблюдениями на независимом оборудовании. На основе численного моделирования выбраны значения для количества частот, циклически обрабатываемых одним приемником в режиме пассивного доплеровского радиозондирования, и длительности наблюдения на одной частоте.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** магнитометр, программно-аппаратный комплекс, доплеровское радиозондирование, спектральное оценивание.

Наведено опис і характеристики модернізованих програмно-апаратних комплексів, що розміщені у виносному пункті (с. Гракове) радіофізичної обсерваторії ХНУ імені В.Н. Каразіна і використовуються для моніторингу геокосмічного середовища в діапазонах геомагнітних пульсацій, а також гекто- та декаметрових радіохвиль. Продемонстровано добре погодження експериментальних даних, які реєструють комплекси, із спостереженнями на незалежному устаткуванні. На основі чисельного моделювання вибрані значення для кількості частот, які циклічно обробляються одним приймачем у режимі пасивного доплерівського радіозондування, і тривалості спостереження на одній частоті.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** магнітометр, програмно-апаратний комплекс, доплерівське радіозондування, спектральне оцінювання.

The specification of upgraded instrumentation and software for monitoring the geospace environment in the range of geomagnetic pulsation and in hectometer and decameter radio wave bands at the Kharkiv V. N. Karazin National University Radiophysical Observatory in the vicinity of Grakovo Village are presented. The data acquired show good agreement with the data acquired by independent instrumentation. Numerical simulations have enabled the selection of the sampling interval at one frequency and the number of operating frequencies processed by one receiver in the passive Doppler sounding mode.

**KEY WORDS:** magnetometer, instrumentation, software, Doppler radio sounding, spectral estimation

### ВВЕДЕНИЕ

В состав радиофизической обсерватории (РФО) ХНУ имени В.Н. Каразина входит измерительный пункт, удаленный от источников мощных промышленных помех и расположенный на Чугуевской наблюдательной станции НИИ астрономии ХНУ имени В.Н. Каразина вблизи с. Граково Харьковской обл., Украина (географические координаты: 49°39' N, 36°56' E). Измерительное оборудование этого пункта включает в себя индуктивный магнитометр-флюксметр ИМ-II и программно-аппаратный комплекс пассивного радиозондирования ионосферы в гекто- и декаметровом диапазоне длин волн. Описание характеристик и режимов работы оборудования публиковалось ранее (см., например, [1 – 3]). В настоящее время измерительный пункт усовершенствован в результате модернизации как аппаратуры, так и программного обеспечения. Целью данной публикации является изложение современного состояния комплексов измерительного пункта и демонстрация их возможностей.

### МАГНИТОМЕТРИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС

С начала 2001 г. на измерительном пункте проводятся непрерывные наблюдения вариаций H и D компонент геомагнитного поля при помощи созданного на кафедре космической радиофизики магнитометрического комплекса. Его основой является индуктивный магнитометр-флюксметр ИМ-II, который изготавливался малой серией в ОКБ Института физики Земли РАН в конце 1980-х гг. Магнитометр позволяет производить измерения в широком диапазоне периодов (1 – 1000 с) и обладает высокой чувствительностью (0,5 – 50 пТ для периодов 1 – 100 с соответственно). Средства калибровки позволяют производить во всем диапазоне рабочих частот сквозную поверку измерительных цепей, включая выносные датчики.

Структурная схема магнитометрического комплекса приведена на рис. 1. Магнитометр ИМ-II подключен к специализированному микроконтроллерному регистратору (МКР). Основой регистратора

является контроллер на базе AVR-процессора (ATmega128 фирмы Atmel) и энергонезависимых часов (DS12887 фирмы Dallas Semiconductor). Согласно записанной в него программе, контроллер производит оцифровку и предварительную фильтрацию магнитометрических сигналов на интервалах 0.5 с, а также сохранение отфильтрованных отсчетов и времени их получения в энергонезависимой USB флеш памяти. Дополнительно МКП выполняет функции блока бесперебойного питания – он осуществляет контроль заряда аккумуляторной батареи напряжением 12 В и емкостью 60 А·ч и наличия напряжения в электросети. При необходимости активизируется зарядная цепь аккумулятора, переключается питание магнитометрического комплекса на аккумулятор при исчезновении напряжения электросети (переход в автономный режим работы), а также

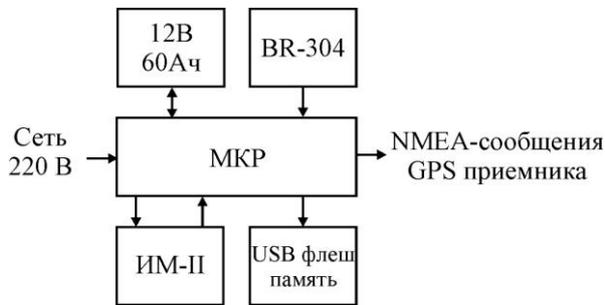


Рис. 1. Блок-схема магнитометрического комплекса. 12 В 60 А·ч – аккумуляторная батарея; BR-304 – приемник сигналов GPS; МКП – микроконтроллерный регистратор; ИМ-II – магнитометр-флюксметр; USB флеш память – энергонезависимый накопитель информации емкостью 4 Гбайт.

около 120 часов его автономной работы. Внешний вид комплекса приведен на рис. 2.

Судить о качестве и достоверности данных, регистрируемых магнитометром, можно путем их сравнения с результатами, полученными от неподалеку расположенного прибора с аналогичными характеристиками. Для этой цели нами были использованы регистрации геомагнитного поля 10 августа 2008 г., полученные в Низкочастотной обсерватории Радиоастрономического института НАНУ, которая расположена в с. Мартовое Печенежского района Харьковской области. Там установлена метеомагнитная станция LEMI-017 разработки Львовского Центра Института космических исследований НАНУ/НКАУ с разрешающей способностью по времени 1 с и чувствительностью 10 пТ. Расстояние от пункта Граково до с. Мартовое приблизительно равно 35 км в северном направлении.

Была применена методика взаимного корреляционного анализа вариаций H и D компонент геомагнитного поля в диапазоне периодов 10 – 100 с на интервалах времени длительностью 1 час. Фильтрация секундных отсчетов производилась путем выполнения прямого преобразования Фурье фрагментов продолжительностью 4096 с с использованием трапецидального окна (“плоская” часть окна длительностью в 1 час, соответствовала интересующему нас часовому интервалу), выделения в полученном спектре гармоник требуемого диапазона периодов и их обратного преобразования. Для анализа использовались центральные фрагменты отфильтрованного ряда длительностью 1 час.

Поскольку магнитометр-флюксметр ИМ-II имеет амплитудно- и фазочастотную характеристики, соответствующие дифферен-

цирующей цепи с постоянной времени  $\tau \approx 3$  с, для исключения влияния нелинейности частотной характеристики косинусные и синусные спектральные компоненты его сигнала дополнительно подвергались следующим преобразованиям:

производится отключение аккумулятора в случае его глубокого разряда. Начальные установки контроллера и смена режимов его функционирования осуществляются при помощи четырехклавишной клавиатуры, состояние контроллера отображается на жидкокристаллическом алфавитно-цифровом дисплее. От приемника GPS сигналов BR-304 МКП получает стандартные NMEA-сообщения с информацией о текущих дате и времени, отправляет их далее на комплекс пассивного радиозондирования, а также ежедневно корректирует показания собственных энергонезависимых часов. Точность временной привязки данных в течение суток не хуже  $\pm 0.1$  с.

Потребляемая модернизированным магнитометрическим комплексом мощность составляет примерно 6 Вт, что обеспечивает



Рис. 2. Внешний вид модернизированного магнитометрического комплекса.

$$U_{c,in} + iU_{s,in} = \frac{K_c U_{c,out} + K_s U_{s,out}}{K_c^2 + K_s^2} + i \frac{K_c U_{s,out} - K_s U_{c,out}}{K_c^2 + K_s^2},$$

где

$$K_c = \frac{1}{1 + (\omega\tau)^{-2}}, \quad K_s = \frac{K_c}{\omega\tau},$$

$U_{in}(\omega) = U_{c,in}(\omega) \cos(\omega t) + iU_{s,in}(\omega) \sin(\omega t)$  и  $U_{out}(\omega) = U_{c,out}(\omega) \cos(\omega t) + iU_{s,out}(\omega) \sin(\omega t)$  – гармонические составляющие входного и выходного сигналов в комплексном представлении соответственно,  $\omega = 2\pi f$  – круговая частота гармоники,  $i$  – мнимая единица. Магнитометр LEMI-017 имеет плоскую частотную характеристику и его данные не требуют дополнительных преобразований.

Результаты расчетов представлены на рис. 3. Видно, что коэффициент корреляции довольно высок и достигает значения 0.99 (особенно для записей Н компоненты геомагнитного поля), а величины среднеквадратического отклонения вариаций на разных магнитометрах практически равны. Смещения максимумов корреляционных функций не превышают разрешающей способности магнитометров по времени, а именно  $\pm 1.5$  с. Это свидетельствует о том, что наблюдаемые процессы в основном синхронные и, видимо, имеют магнитосферное происхождение. Корреляция между вариациями D компоненты иногда существенно уменьшается (до величин 0.4–0.5), или даже наблюдается их полная декорреляция, когда  $|K_D| < 0.2$ . В эти же моменты времени имеет место уменьшение величины среднеквадратического отклонения до значений 0.1 нТ и менее. Такое поведение может объясняться либо увеличением влияния местных помех, либо проявлением более слабых вариаций ионосферного происхождения, которые не являются синхронными во времени для разнесенных пунктов наблюдения. Также следует иметь в виду, что для магнитосферных источников величина вариаций D компоненты обычно меньше, чем для Н вариаций.

### ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС ПАССИВНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ

Комплекс служит для исследования вариаций характеристик отраженных ионосферой радиоволн. Он может работать в режиме доплеровского радиозондирования с использованием распространяющихся

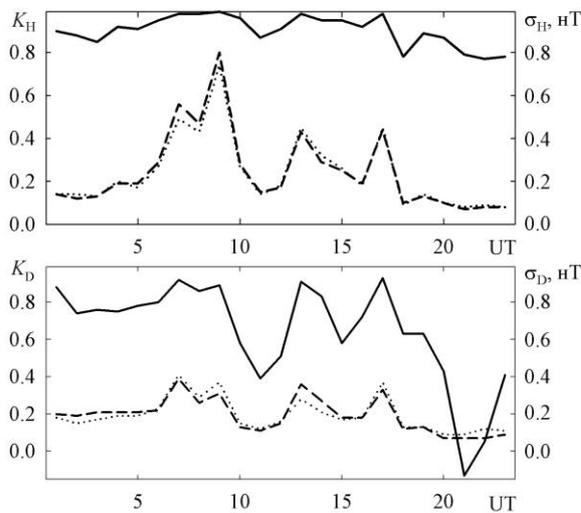


Рис. 3. Временной ход рассчитанных на часовых интервалах времени коэффициентов взаимной корреляции  $K$  (непрерывные линии) между вариациями Н (верхняя панель) и D (нижняя панель) компонент геомагнитного поля с периодами 10 – 100 с, зарегистрированных в разнесенных пунктах наблюдения Граково и Мартовое 10 августа 2008 г., а также величины их среднеквадратического отклонения  $\sigma$  (точки соответствуют данным из пункта Граково, пунктир – из пункта Мартовое).

на наклонных трассах сигналов, или в режиме панорамных измерений радиопомеховой обстановки. Источником сигналов для режима доплеровского зондирования являются станции радиовещания, радионавигации, службы точного времени или же радиоизлучение специализированных радиопередающих устройств. Режим панорамных измерений основан на анализе в заданном диапазоне частот статистических характеристик мощности электромагнитного поля, которое является суперпозицией узкополосных излучений удаленных радиопередающих устройств различного назначения и шумоподобных радиопомех, генерируемых естественными и искусственными источниками. При этом диапазон частот выбирается относительно широким, чтобы в него с большой вероятностью попадало достаточное количество узкополосных удаленных источников радиоизлучения.

Программное обеспечение комплекса пассивного радиозондирования ионосферы включает измерительные программы для двух вышеупомянутых режимов работы, программы для обработки экспериментальных данных, а также набор тестовых программ для

проверки и ремонта отдельных узлов блока управления радиоприемными устройствами.

Конструктивно комплекс реализован на базе персонального компьютера с подключенным к нему блоком управления радиоприемниками синтезаторного типа, собственно приемников Р-399А и Р-391В2 для приема радиосигналов в диапазонах 1 – 32 МГц и 50 кГц – 2 МГц соответственно (осуществляющих первые два преобразования частоты радиосигналов и основное их усиление), блока третьих смесителей частоты с фильтрами нижних частот, синтезатора частоты Ч6-31 в качестве общего 3-го гетеродина, а также распределителя антенного сигнала. Сигнал частотой 5 МГц от опорного генератора одного из приемников является общим для всех остальных приемников, а также для программируемого делителя частоты запуска аналого-цифровых преобразователей (АЦП). Термостатированные опорные генераторы использованных радиоприемных устройств и синтезатора Ч6-31 согласно технической документации обеспечивают долговременную относительную нестабильность частотно-временных параметров комплекса не хуже  $5 \cdot 10^{-8}$ . Как будет показано ниже, реальное ее значение почти на порядок меньше.

Режим доплеровского радиозондирования является основным рабочим режимом. Структурная схема комплекса в этом режиме приведена на рис. 4. Блок управления принимает от компьютера (ПЭВМ) через согласующие интерфейсные блоки (БИФ1 и БИФ2) и сохраняет во внутренних регистрах плат управления (ПУ1–ПУ5) бинарные коды информации, которые определяют настройки соответствующего радиоприемного устройства: род его работы, частоту принимаемого сигнала, ширину полосы пропускания усилителя промежуточной частоты (УПЧ), коэффициент усиления УПЧ и значение ослабления входного аттенюатора. Для установки коэффициента усиления УПЧ на плате управления предусмотрен десятипозиционный цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП), каждая следующая позиция которого уменьшает коэффициент усиления в 2 раза по сравнению с предыдущей. Радиоприемные устройства работают в режиме полного дистанционного управления, что позволяет с помощью одного радиоприемного устройства циклически производить измерения на нескольких радиотрассах с заданными установками усиления для каждой частоты. При этом удается сохранить достаточно высокую разрешающую способность как по частоте, так и по времени.

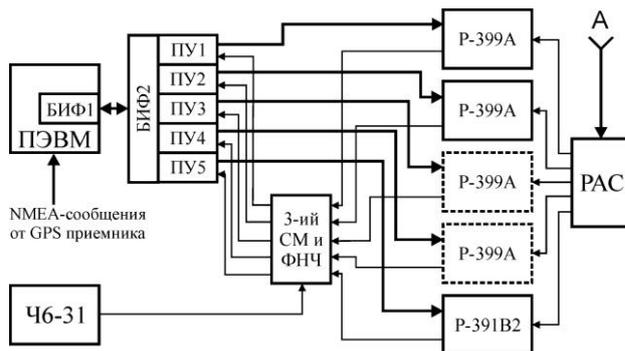


Рис. 4. Структурная схема комплекса пассивного зондирования ионосферы. ПЭВМ – персональная электронно-вычислительная машина, БИФ1 и БИФ2 – согласующие интерфейсные блоки, ПУ1–ПУ5 – платы управления приемниками, Р-399А – приемник радиосигналов декаметрового диапазона (пунктирный контур приемника указывает на перспективную возможность его подключения), Р-391В2 – приемник радиосигналов гектометрового диапазона, А – приемная антенна, РАС – распределитель антенного сигнала, Ч6-31 – синтезатор сигнала 3-го гетеродина, 3-ий СМ и ФНЧ – блок 3-их смесителей частоты и фильтров нижних частот.

Для цифровой фильтрации синтезирован оптимальный полосовой фильтр с конечной импульсной характеристикой [4]. Фильтры этого типа абсолютно устойчивы к различного рода погрешностям данных, они имеют линейную фазовую характеристику и достаточно просто синтезируются по таким заданным параметрам, как длина фильтра, ширина полосы на уровнях пропускания и задерживания, а также соотношение неравномерностей амплитудно-частотных характеристик в полосах пропускания и задерживания. Под оптимальностью полосового фильтра понимается максимальное подавление в полосе задерживания при заданных остальных параметрах.

Синтезированный цифровой фильтр длиной 120 точек имеет ширину полосы пропускания  $0.04f_n$  на уровне 0.1 (здесь  $f_n$  – частота дискретизации), центральная частота равняется  $0.25f_n$ , а коэффициент подавления внеполосных составляющих составляет около 40 дБ. Амплитудно-частотная характеристика

На антенные входы радиоприемных устройств сигнал поступает с распределителя антенного сигнала (РАС). С выходов усилителей 2-ой промежуточной частоты приемников радиосигналы с частотой 215 кГц и шириной полосы 300 Гц поступают в блок третьих смесителей частоты и фильтров нижних частот (3-ий СМ и ФНЧ). На выходе фильтров нижних частот присутствуют аналоговые сигналы в полосе частот  $0 \div 300$  Гц. С помощью 10-разрядных АЦП типа Ф7077М/1, установленных на соответствующих ПУ, сигналы преобразуются в цифровой вид с частотой дискретизации 600 Гц. Поток цифровых данных из АЦП вводится в компьютер, и производится дальнейшая обработка сигнала в реальном масштабе времени под управлением измерительной программы. В процессе этой обработки последовательно выполняется фильтрация данных узкополосным цифровым фильтром и децимация с коэффициентом 15.

цифрового фильтра  $S(\omega) = 20 \lg[U_{out}(\omega)/U_{in}(\omega)]$  представлена на рис. 5. При  $f_n = 600$  Гц на выходе фильтра остается сигнал с центральной частотой 150 Гц и шириной полосы приблизительно 20 Гц.

Следующая затем децимация с коэффициентом 15 преобразует его в сигнал с полосой от 0 до 20 Гц при частоте дискретизации 40 Гц. Эти данные блоками по 512 точек (или по 12.8 с времени измерения), с описательным заголовком, сохраняются в едином суточном файле экспериментальных данных на компьютере. В заголовке каждого блока данных фиксируется время начала его регистрации и частота принимаемого при этом радиосигнала. Периодичность измерения блоков данных составляет 15 с. Временная привязка начала каждого измерения с точностью не хуже  $\pm 0.1$  с осуществляется по сигналу GPS приемника, транслируемого магнитометрическим комплексом.

В функции измерительной программы входит контроль уровня принимаемого радиосигнала, а также автоматическая корректировка текущих значений коэффициентов усиления УПЧ и входных аттенуаторов приемников для исключения динамической перегрузки приемного тракта или пропадания сигнала. Эти текущие значения учитываются при расчете амплитуды цифровых сигналов, записываемых в файл регистрации.

Алгоритм программы обработки записей доплеровского зондирования заключается в выделении из суточного файла блоков данных для сигнала требуемой частоты, получении по ним спектральных оценок с заданной точностью и частотным разрешением, выявлении на них основных мод радиосигнала (этимими модами могут быть как различные магнитоионные компоненты, так и лучи, отражающиеся от различных ионосферных слоев), а также исследовании динамики этих мод. Традиционно используемым для спектрального оценивания алгоритмам, основанным на преобразовании Фурье, присущи такие недостатки, как влияние функции окна на разрешающую способность по частоте и фиксированная частотная сетка, определяемые длиной временного ряда. Так, при продолжительности записи блока данных 12.8 с разрешение по частоте будет не лучше 0.2 – 0.3 Гц, т.е. имеет такой же порядок, как и величина наблюдаемых в эксперименте доплеровских флуктуаций частоты отраженного от ионосферы декаметрового радиосигнала.

Другой подход основан на параметрическом описании случайного процесса, который порождается суммой отраженных от ионосферы и принятых приемником радиосигналов, а конкретнее на модели авторегрессионного (АР) процесса [5]. Эта модель хорошо описывает данные измерений при ограниченном числе сильных мод и отношении сигнал/помеха порядка или более 10 дБ. Для расчета коэффициентов АР модели нами был реализован метод совместной минимизации квадратичных ошибок прямого и обратного линейного предсказания (модифицированный ковариационный метод [5]). Вычисленные по этим коэффициентам АР спектры позволяют для фрагмента данных, продолжительностью 12.8 с, определять частоту моды с точностью до 0.01 – 0.02 Гц, а разрешение по частоте достигает 0.05 – 0.06 Гц.

Ширина линий в АР спектрах весьма мала (в нашем случае менее 0.03 Гц на уровне 0.5). Поэтому проследить динамику мод на соседних спектрах, даже рассчитанных с интервалом 15 с, может быть непросто, если за это время частота моды изменится на величину, значительно превосходящую ширину линии. С другой стороны, блочная структура данных не позволяет использовать для расчетов “скольжение”, т.е. части соседних блоков, поскольку данные в них не являются непрерывными по времени и фазе. Для вычисления промежуточных спектров мы воспользовались межблочной линейной интерполяцией коэффициентов авторегрессии. В большинстве проанализированных нами случаев при интервале времени 7.5 с между спектральными оценками можно достаточно уверенно судить о динамике модового состава. Поэтому, в процессе обработки, после расчета “базовых” спектров (БС) по имеющимся блокам экспериментальных данных, вычислялись “интерполированные” спектры (ИС) с указанным интервалом времени между ними. При этом в зависимости от интервала времени между БС приходится рассчитывать от одного до семи ИС. Само значение интервала определяется числом каналов, которые циклически регистрируются одним приемником.

Для исследования зависимости качества результатов спектрального оценивания от значения интервала времени между БС и отношения сигнал/шум проведен численный эксперимент, в котором

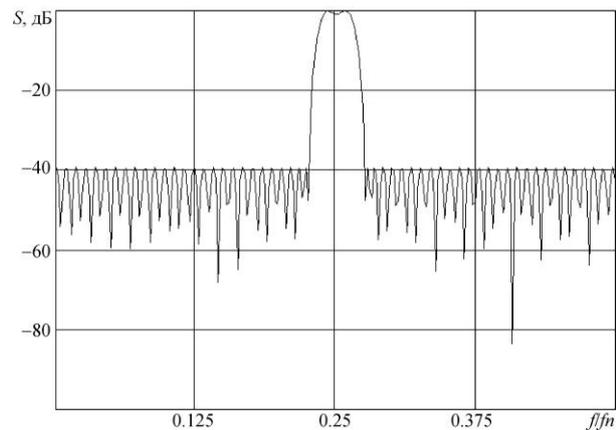


Рис. 5. Амплитудно-частотная характеристика используемого цифрового фильтра.

генерировалась последовательность фрагментов временных рядов, содержащих по 512 равномерно распределенных на интервале времени 12.8 с точек. Временные ряды порождались модельными процессами, состоящими из двух или трех гармоник одинаковой амплитуды и аддитивного белого шума с гауссовским распределением; отношение сигнал/шум варьировалось от 10 до 40 дБ. Общая длительность последовательности фрагментов равнялась 30 мин, интервал времени между началами фрагментов составлял 15 с. Первая гармоника процессов имела частоту, меняющуюся по синусоидальному закону в пределах от 9.9 до 10.1 Гц с периодом 4 мин, вторая гармоника имела частоту, меняющуюся по антикосинусоидальному закону в пределах от 9.8 до 10.2 Гц с периодом 12 мин, а третья гармоника имела постоянную частоту 10 Гц. Графики зависимости частоты гармоник от времени приведены в верхней части рис. 6 для процессов, состоящих из двух (слева) и трех (справа) гармоник.

Каждый фрагмент последовательности подвергался спектральному оцениванию. Результаты вычислений группировались в виде плоскостей динамических спектров с яркостным представлением относительной амплитуды спектральных составляющих (черный цвет соответствовал локальному максимуму, белый – локальному минимуму). Динамические спектры всех фрагментов, полученные с использованием быстрого преобразования Фурье (БПФ) и на основе авторегрессионного представления, приведены на рис. 6 на вторых и третьих сверху графиках соответственно; в последнем случае между каждой парой “базовых” АР спектров рассчитывался один ИС.

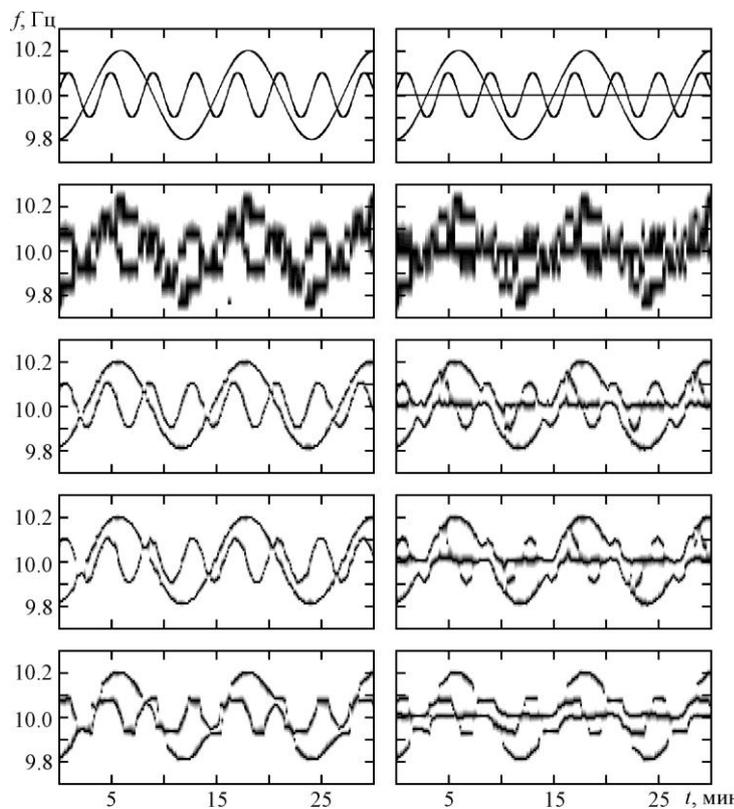


Рис. 6. Зависимость динамических спектров, полученных различными методами, от интервала времени между обрабатываемыми фрагментами длительностью по 12.8 с для различных моделей порождающего сигнал процесса. Отношение сигнал/шум составляло 20 дБ. Графики сверху вниз соответствуют: 1 – виды моделей процесса; 2 – динамические спектры при использовании БПФ (интервал времени между фрагментами 15 с); 3, 4 и 5 – то же для авторегрессионных спектров и интервалов между обрабатываемыми фрагментами 15 с, 30 с и 1 мин соответственно.

Отчетливо проявляется дискретная частотная сетка с шагом 0.08 Гц на результатах, полученных методом БПФ, а спектральные максимумы достаточно широкие. В связи с этим вид модели из двух гармоник угадывается с трудом, а для модели из трех гармоник составляющая с девиацией частоты  $\pm 0.1$  Гц оказывается замаскированной гармоникой с постоянной частотой. Значительно лучшие результаты имеют место при использовании АР спектров. Восстановление по ним вида процесса из двух гармоник не вызывает затруднений, а для процесса из трех гармоник некоторые трудности связаны с большим количеством пересечений частотных “следов” гармоник. Из-за конечного значения разрешающей способности, определяемой длиной фрагмента данных, на графике имеют место разрывы и ложные соединения “следов” различных гармоник. Зависимость результатов, получаемых при использовании АР подхода, от интервала времени между БС иллюстрируют три нижние пары графиков на рис. 6. Четвертые сверху графики получены при обработке каждого второго фрагмента последовательности и дополнении его тремя “интерполированными” АР спектрами. Нижние графики приведены для случая, когда БС рассчитывались для каждого четвертого фрагмента, а между ними добавлялось по семь ИС. Эти случаи соответствуют периодически-циклическому измерению одним

приемником радиосигналов на двух и четырех различных трассах соответственно. Видно, что отличия между третьими и четвертыми сверху графиками незначительны, а на нижних графиках уже

наблюдается существенное искажение формы девиации частоты второй гармонической составляющей моделей. В связи с этим дальнейшее увеличение интервала между БС, по-видимому, нецелесообразно ввиду сильного искажения динамической картины исследуемого процесса, а соответствующее количество радиотрасс, анализируемых одним приемником, не должно превышать четырех.

Влияние шума на результаты расчетов иллюстрирует рис. 7. “Базовые” АР спектры вычислялись для каждого второго фрагмента из последовательности и между каждой их парой добавлялось по три ИС. Верхние графики, как и на рис. 6, представляют зависимости частоты гармоник моделей от времени. Остальные графики сверху вниз соответствуют динамическим спектрам, рассчитанным для модельных данных при отношении сигнал/шум 40 дБ, 20 дБ и 10 дБ соответственно (т.е. перекрывают практически весь диапазон значений, с которыми реально приходится иметь дело в экспериментах). Видно, что качество результатов ухудшается как при увеличении уровня шума, так и при его уменьшении. Последнее обстоятельство является известным фактом для АР спектрального оценивания и объясняется быстрым уменьшением порядка АР-модели, коэффициенты которой подбираются в процессе вычислений. Как следствие, увеличивается ширина спектральных линий. Тем не менее, во всех представленных случаях качество результатов оказывается вполне удовлетворительным.

Демонстрацией хороших показателей стабильности частотно-временных параметров модернизированного измерительного комплекса в режиме пассивного доплеровского радиозондирования может служить рис. 8. Здесь представлен фрагмент продолжительностью 1 час экспериментальной регистрации радиосигнала специализированного передатчика с частотой примерно 4.2 МГц на слабо наклонной трассе (расстояние между передающим и приемным пунктами около 50 км). При этом приемник периодически-циклично принимал сигналы на двух частотах: приблизительно 3.2 МГц и 4.2 МГц. Спектральное оценивание выполнялось с использованием авторегрессионного представления, между каждой парой “базовых” АР спектров рассчитывалось по три “интерполированных”. На рисунке в левой части наблюдаются доплеровские флуктуации отраженного от ионосферы радиосигнала относительно аппаратно заданной частотной “подставки” величиной 10.67 Гц. Эта “подставка” вводилась специально для определения знака доплеровского смещения частоты. Одновременно на приемную антенну наводился слабый сигнал синтезатора частоты Ч6-31, несинхронизированного с опорными генераторами остальных устройств комплекса и с частотой примерно на 5 Гц большей, чем у сигнала удаленного передатчика. В правой части рис. 8 эти одновременные записи ионосферного и местного сигналов представлены в более крупном масштабе. Видно, что вариации частоты местного сигнала не превышают значения  $\pm 0.01$  Гц, которое близко к величине предельной точности определения частоты программой спектральной обработки. Такая ситуация возможна, если вариации опорных частот вследствие нестабильности у использованных приборов полностью синхронны, либо их реальная величина значительно меньше указанного в технической документации верхнего предела. Первое представляется маловероятным. Следовательно, реальная относительная нестабильность частотно-временных параметров комплекса не превышает  $5 \cdot 10^{-9}$ . Наблюдаемые вариации доплеровского смещения

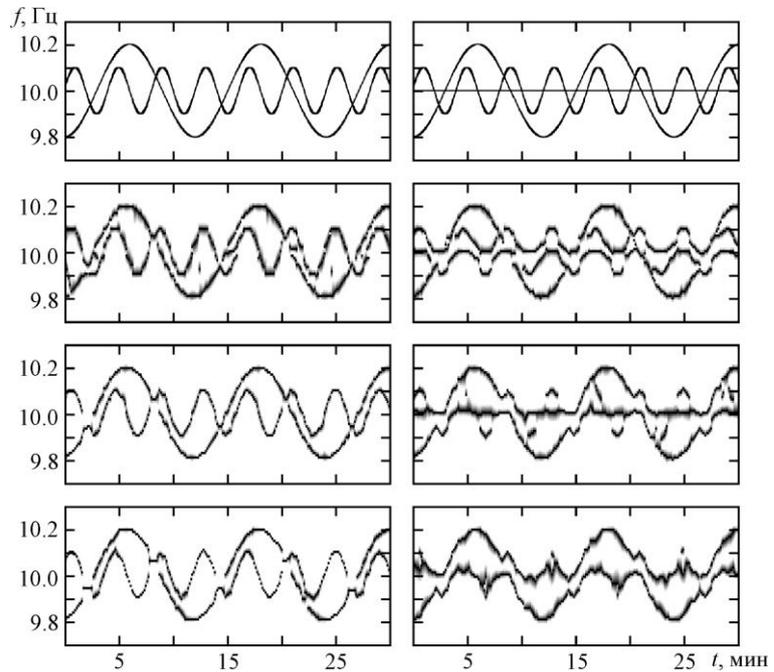


Рис. 7. Зависимость динамических спектров, полученных на основе авторегрессионного представления, от значения отношения сигнал/шум для различных моделей порождающего сигнал процесса. Интервал времени между обрабатываемыми фрагментами длительностью по 12.8 с составляет 30 с. Графики сверху вниз соответствуют: 1 – виды моделей процесса; 2, 3 и 4 – динамические спектры при отношении сигнал/шум 40дБ, 20 дБ и 10 дБ соответственно.

частоты ионосферного сигнала составляют 0.2 – 0.6 Гц, что значительно превосходит как величину предельной точности программы, так и значение разрешающей способности метода для блоков данных длительностью 12.8 с. Благодаря этому проследить динамику спектральной моды практически не представляет затруднений.

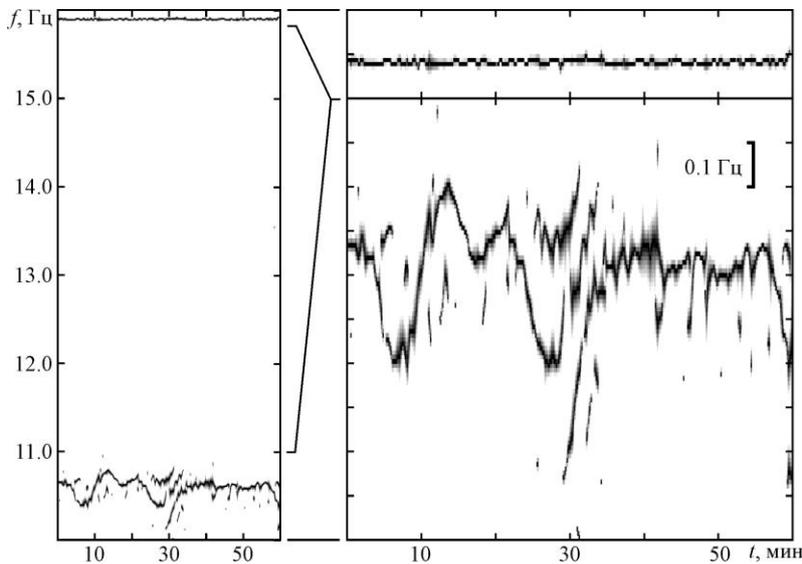


Рис. 8. Фрагмент плоскости динамических спектров радиосигналов частотой около 4.2 МГц, зарегистрированных в эксперименте 22 сентября 2010 г. В верхней части – сигнал местного стабильного генератора, в нижней части – одновременно с ним регистрируемый отраженный от ионосферы сигнал специализированного передатчика.

В режиме панорамных измерений блок 3-их смесителей частоты и ФНЧ не используется – вместо него включаются обычные амплитудные детекторы, с выхода которых сигнал подается непосредственно на АЦП. Обычно в этом режиме устанавливается полоса пропускания УПЧ равной 6 кГц, а частота дискретизации – 10 кГц. Диапазон сканируемых частот выбирается равным полному рабочему диапазону приемника, либо его части, а шаг перестройки по частоте составляет 5 кГц. На каждой частоте производится выборка 100 значений амплитуды сигнала, которые затем корректируются в соответствии с текущими установками входного аттенюатора и позиции ЦАП

регулятора усиления УПЧ, усредняются по амплитуде и мощности; результаты сохраняются в суточном файле регистрации на компьютере. Максимальная длительность сканирования всех частот в диапазоне 1–31 МГц с учетом времен перестройки приемника и измерения не превышает 2 мин. Этот режим является вспомогательным. Он используется как с целью поиска удобных для доплеровских измерений вещательных станций, так и в качестве независимого метода исследования состояния ионосферы.

### ВЫВОДЫ

В РФО ХНУ имени В.Н. Каразина (измерительный пункт Граково) функционирует два современных многоцелевых программно-аппаратных комплекса, обладающих высокой степенью автоматизации процесса измерений. Технические характеристики аппаратуры и программные средства, использующие современные методы цифровой обработки данных, позволяют с высоким временным разрешением получать результаты, удовлетворяющие основным требованиям к достоверности и точности экспериментальных исследований геокосмической среды.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гармаш К.П., Розуменко В.Т., Тырнов О.Ф., Цымбал А.М., Черногор Л.Ф. Радиофизические исследования процессов в околоземной плазме, возмущенной высокоэнергичными источниками. Часть 1 // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. – 1999. – № 7. – С. 3 – 15.
2. Garmash K.P., A.M. Gokov, L.S. Kostrov, V.T. Rozumenko, O.F. Tyrnov, Y.P. Fedorenko A.M. Tsymbal, and L.F. Chernogor. Radiophysical Investigations and Modeling of Ionospheric Processes Generated by Sources of Various Nature. 1. Processes in a Naturally Disturbed Ionosphere. Technical Facilities // Telecommunications and Radio Engineering. – 1999. – Vol.53, N. 4–5. – P. 6 – 20.
3. Гармаш К.П., Леус С.Г., Пазюра С.А., Похилько С.Н., Черногор Л.Ф. Статистические характеристики флуктуаций электромагнитного поля Земли // Радиофизика и радиоастрономия. – 2003. – Т. 8, №2. – С. 163 – 180.
4. Рабинер Л, Гоулд М. Теория и применение цифровой обработки сигналов. – М.: Мир – 1978. – 848 с.
5. Марпл-мл. С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. – М.: Мир – 1990. – 584 с.