

На правах рукописи

Латыпов Руслан Рустемович

**РАЗВИТИЕ МЕТОДА СПЕКТРАЛЬНО ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ
ИЗМЕРЕНИЙ ДЕКАМЕТРОВОГО РАДИОСИГНАЛА**

Специальность 01.04.03. – радиофизика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Казань – 2009

Работа выполнена на кафедре радиофизики ГОУ ВПО «Казанский государственный университет им. Ульянова-Ленина».

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук,
профессор **Шерстюков Олег Николаевич**

Научный консультант:

кандидат физико-математических наук,
доцент **Теплов Вадим Юрьевич**

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,
профессор **Смоляков Борис Петрович**
кандидат физико-математических наук,
доцент **Колчев Алексей Анатольевич**

Ведущая организация:

Защита диссертации состоится «__» _____ 2009 г. в __ ч. __ мин. в ауд. 210 физического факультета Казанского государственного университета на заседании Диссертационного совета Д.212.081.18 при ГОУ ВПО «Казанский государственный университет им. Ульянова-Ленина» по адресу: 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, 18.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке им. Н.И. Лобачевского Казанского государственного университета.

Автореферат разослан

«__» _____ 2009 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.081.18,
доктор физ.-мат. наук, профессор

Карпов А.В.

Общая характеристика работы

Исследованию ионосферы, части средней и верхней атмосферы Земли, уделялось с момента её открытия довольно много внимания, однако с развитием новых средств связи, например, спутниковой, интерес к ионосфере начал уменьшаться. В настоящее время вследствие необходимости обеспечения высокого качества связи, актуальность исследования процессов, протекающих в ионосфере как в среде распространения радиоволн, возрастает. Современная исследовательская и связная техника позволяют изучать ионосферу на качественно новом уровне. Объектами исследования при этом выступают не только ионосфера как среда распространения радиоволн, но и собственные процессы, происходящие внутри ионосферной плазмы. Вследствие своего расположения и внутренней структуры ионосфера очень чувствительна к магнитным и электрическим полям, воздействию корпускулярных потоков, например, солнечных, то есть обладает хорошими диагностическими возможностями для наблюдения и мониторинга не только внешних космических воздействий, но и внутренних, имеющих земную природу (включая антропогенное воздействие).

Ионосфера вносит различные искажения в передаваемый радиосигнал. Наиболее эффективно это воздействие проявляется для волн коротковолнового (КВ) диапазона (3–30 МГц). В зависимости от параметров ионосферы коротковолновые радиоволны могут быть переданы на дальние, а иногда и сверхдальние расстояния, включая кругосветное распространение. Но основным недостатком ионосферной связи является многолучевость сигнала, приводящая к замираниям или к полному разрушению канала связи. То есть радиолуч, излученный передатчиком, после прохождения слоистой пространственно неоднородной ионосферы будет создавать на приёмной антенне сложную интерференционную картину, динамически меняющуюся во времени. Несмотря на эти недостатки, коротковолновая связь не теряет свою важность и в настоящее время, являясь порой единственным широкодоступным каналом дальней радиосвязи. Кроме того, она до сих пор является запасным каналом связи для различных служб. Эффективность современных цифровых систем связи напрямую зависит от качества канала радиосвязи, которое, в свою очередь неразрывно связано с состоянием ионосферы.

Основными методами получения информации об ионосфере являются радиофизические методы наблюдения ионосферы. Использование классических средств диагностики, импульсных вертикальных ионозондов, не всегда возможно, так как необходимо располагать ионозонд непосредственно под точкой наблюдения, что может быть невозможно по различным причинам. Использование комплексов наклонного зондирования решает эту проблему. Ставшие классическими системы пространственно разнесённого приёма позволяют исследовать характеристики коротковолнового радиосигнала, но при этом характерные размеры антенного поля таких радиосистем составляют до нескольких километров. Одним из способов избавиться от громоздкой антенной системы является использование метода частотно-пространственно разнесённого приёма (ЧПРП). Это позволяет уменьшить количество радиоприёмных каналов до трёх–четырёх, уменьшить габариты приёмной антенной системы до размеров, сравнимых с длиной принимаемой радиоволны, равной единицам десятков метров. При использовании этого метода разделение различных мод радиосигнала происходит в частотной области на основе спектральных параметров. Основным недостатком метода является необходимость длительных измерений для достижения высокого спектрального разрешения, что не всегда возможно из-за постоянного изменения состояния ионосферной плазмы, которое обусловлено различными факторами. Выбор времени наблюдения определяется средним временем стационарности принимаемого радиосигнала, максимальное значение которого

для средних широт изменяется от 20 до 300 секунд, то есть наихудшее спектральное разрешение составляет порядка 0.05 Гц. Такое разрешение не всегда удовлетворяет требованиям разделения мод сигнала, так как в случае спокойной ионосферы разница между ними может быть менее 0.01 Гц. Это приводит к ухудшению точностей спектрального разрешения и определения углов прихода радиолуча. Но основной вклад в точностные параметры вносят поляризационные затухания, которые обуславливают интерференцию нескольких мод сигнала, не делимых в спектральной области.

Одним из методов разделения мод является спектрально-поляризационный метод. Использование спектрально-поляризационного метода позволяет разделять составляющие сигнала неразличимые по доплеровскому сдвигу частоты. Но при этом к недостаткам этого метода можно отнести существенные ограничения на приёмную аппаратуру, например, необходимость использовать антенны, размеры которых существенно меньше длины волны, что ведет к повышению требований к чувствительности приёмников. Изложенное выше свидетельствует о насущной проблеме модернизации спектрально-поляризационного метода в плане расширения возможностей его применения в системах с реальными электрическими антеннами и приёмными устройствами.

Цели и основные задачи диссертационной работы. Целью данной диссертационной работы заключается в развитии спектрально-поляризационного метода путем повышения точности определения углов прихода радиоволн при наклонном зондировании ионосферы для задач изучения радиосвязи и дистанционного мониторинга динамических процессов в ионосфере.

В соответствии с поставленной целью в настоящей работе были поставлены и решены следующие задачи:

1. Развитие спектрально-поляризационного метода исследования радиоволн на основе методики учета изменения фазы радиоволны вдоль полотна антенны, характерные размеры которой сопоставимы с длиной волны. Оценка точности определения углов прихода радиоволны, сравнение полученных результатов с результатами моделирования с использованием модели IRI-90 для проверки адекватности проведенных расчетов.
2. Разработка аппаратных и программных средств, реализующих приём и последующую обработку декаметрового радиосигнала спектрально-поляризационным методом. Разработка поляризационной антенной системы для доплеровского фазоугломерного комплекса «Спектр» с характерными размерами, сопоставимыми с длиной принимаемой радиоволны (то есть конечными размерами).
3. Экспериментальные исследования вариаций углов прихода радиоволны (азимутального угла и угла места) и эллипса поляризации принимаемого радиосигнала от различных вещательных коротковолновых передатчиков.

Объект исследования. Спектрально-поляризационный метод исследования динамических процессов в ионосфере.

Предмет исследования. Методика определения углов прихода радиоволны на основе спектрально-поляризационного метода и практическая реализация в виде экспериментальных исследований.

Методы исследования. Сформулированные в диссертации научные положения и выводы базируются на методах теории поля для приближения геометрической оптики, методах математического моделирования, методах математической статистики, т.е. методах с хорошо изученными границами применимости. Эксперимент был произведен с применением метода наклонного зондирования ионосферы с использованием доплеровского фазоугломерного комплекса «Спектр». При обработке экспериментальных

данных использовались спектральные, поляризационные и статистические методы обработки данных.

Достоверность результатов и выводов диссертационной работы определяется использованием адекватного математического аппарата при расчетах, повторяемостью результатов, сопоставлением модельных реализаций с экспериментальными измерениями, а также проверкой на соответствие выводам других авторов.

Научная новизна результатов диссертационной работы определяется тем, что в ней впервые:

- 1). разработана методика спектрально-поляризационных измерений радиосигнала, решающая обратную задачу по определению направления прихода радиолуча и восстановлению эллипса поляризации, на основе учета изменения фазы радиоволны вдоль элемента антенн. Метод применён для реальной четырёхканальной приёмной антенной системы с конечной длиной элементов;
- 2). разработан и реализован автоматический комплекс непрерывного наклонного мониторинга ионосферы с системой оперативной калибровки принимаемого сигнала и поляризационной антенной системой, с характерными размерами, сравнимыми с длиной принимаемой радиоволны;
- 3). создана методика анализа пространственно временных вариаций ионосферных возмущений на основе поляризационных параметров радиосигнала. Исследованы вариации параметров эллипса поляризации сигналов вещательных радиостанций спектрально-поляризационным методом, в результате которых обнаружены вариации обратного коэффициента эллиптичности с периодами 10 – 100 мин.

Научная и практическая значимость. Проведенная работа расширяет возможности как исследования ионосферы, так и исследования распространения радиоволн на радиотрассах коротковолнового диапазона. Разработаны математические модели определения оптимальной конфигурации антенной системы, вычисления суммарной ошибки измерения углов прихода радиоволны. Создана методика, позволяющая осуществлять непрерывную калибровку сигнала.

Предложенный в работе метод позволяет получать на компактной антенной системе, размеры которой сравнимы с длиной принимаемой радиоволны, направление прихода радиолуча, поляризационные характеристики принимаемого радиосигнала. На основе этих параметров возможно разделить магнитоионные компоненты принимаемого радиосигнала в спектральной области. Кроме того, при использовании спектрально поляризационного метода автоматически появляется возможность совместного исследования вариаций амплитуды и доплеровского сдвига принимаемого радиосигнала.

Экспериментально подтверждена возможность использования поляризационной антенной системы с характерными размерами антенных элементов, сравнимых с длиной волны (без использования при расчете приближения точечной антенны) в угломерных измерениях ионосферного сигнала с высокой точностью.

На защиту выносятся следующие положения.

1. Модифицированный спектрально-поляризационный метод и разработанная на его основе методика определения углов прихода радиоволны различной поляризации, применённая к коротковолновому диапазону, для случая антенной системы, сравнимой с длиной волны. Оценка точностных характеристик углов прихода радиоволны в предложенной методике.

2. Автоматический угломерный комплекс (аппаратная и программная части) с возможностью измерения поляризационных характеристик радиосигнала. Поляризационная антенная система комплекса, размеры которых сравнимы с длиной принимаемой радиоволны. Алгоритмы удаленного управления и контроля созданного автоматического комплекса.

3. Закономерности, полученные в результате спектрально поляризационных измерений, в числе которых углы прихода радиолуча, с учетом поляризационного разделения, вариации обратного коэффициента эллиптичности и направления большой полуоси эллипса поляризации.

Личный вклад. Учитывая, что экспериментальные исследования со значительным объемом получаемых данных невозможно провести единолично, роль диссертанта в них заключалась в:

- модификации совместно с В.В. Бочкаревым спектрально-поляризационного метода, в котором осуществлён переход от идеализированной точечной антенной системы к системе с конечной длиной радиоприёмной антенны, что позволяет корректировать получаемые угломерные данные;
- произведении расчета и проектировании поляризационной антенной системы комплекса, разработке блок-схемы алгоритма автоматического управления и независимого контроля угломерным комплексом;
- реализации на их основе: программного обеспечения, электрических принципиальных схем устройств удалённого управления и независимого контроля;
- разработке блок-схемы и схемы электрической принципиальной, программного кода для модуля цифрового приёма;
- активном участии в проведении нескольких длительных измерительных компаний в период с 2002 по 2008 гг.;
- обработке и анализе полученных экспериментальных данных;
- публикации научных результатов и написании отчетов.

По этой же причине публикации диссертанта имеют соавторство, однако результаты по указанным направлениям принадлежат лично автору диссертации.

Апробация результатов и публикации. Основные результаты работы были опубликованы в Российских реферируемых научных журналах и представлялись на конференциях: XXI Всероссийской конференции по распространению радиоволн (Йошкар-Ола, 2005), XXII Всероссийской конференции по распространению радиоволн (Ростов-на-Дону, 2008), VII, IX, X Байкальских международных школах по фундаментальной физике (Иркутск, 2004; Иркутск, 2006; Иркутск, 2007), на III, IV, V международных конференциях «Излучение и рассеяние ЭМВ» (Таганрог, 2003; Таганрог, 2005; Таганрог, 2007), на XI Международном симпозиуме «Оптика атмосферы и океана» (Томск, 2004), YouthPhys'05 School-Workshop Tomsk (Томск, 2005), VI Международной научно-технической конференции «Физика и технические приложения волновых процессов» (Казань, 2007) а также докладывались на научных семинарах и ежегодных отчетных конференциях Казанского государственного университета (2002 – 2007).

Всего автором по теме диссертации опубликовано 16 работ, из них одна – в издании, рекомендованном ВАК РФ ("Ученые записки Казанского государственного университета").

Реализация результатов. Результаты, полученные в диссертационной работе, использовались при выполнении грантов РФФИ: № 01-05-65251-а (исполнитель), № 03-07-90288-в (исполнитель), № 05-05-64651-а, № 07-05-90810-моб_ст (исполнитель), а так же госбюджетных тем Казанского государственного университета (КГУ): 1.7.06. «Исследование метеорно-ионосферных процессов и неоднородной структуры атмосферы земли», 1.6.08ц. «Развитие методов фазовых измерений для задач мониторинга и распространения радиоволн», 1.6.07ц. «Разработка информационных систем получения, обработки и хранения геофизической информации для исследования атмосферы Земли и околоземного пространства».

Результаты исследования также используются в качестве лабораторных работ при чтении спецкурса «Радиофизические методы исследования природных сред».

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4-х глав и заключения, содержит 121 страницу основного текста, 34 рисунка, 1 таблицу и 115 источников библиографического списка.

Основное содержание диссертации. Во **введении** дана общая характеристика работы, раскрыта ее актуальность, сформулированы цель работы и основные положения, выносимые на защиту, обоснована научная новизна, научная и практическая значимость выполненных исследований, приведена структура диссертации.

В **первой главе** анализируются методы исследования ионосферы для исследования динамических процессов в ионосферной плазме. Даны краткие описания характеристик импульсного метода, метода зондирования сигналами с линейно – частотной модуляцией, метода некогерентного рассеяния, метода измерения интегральной электронной концентрации с использованием данных глобальной навигационной сети GPS. Показаны их преимущества и недостатки для различных задач исследования распространения радиоволн. Наибольшее внимание уделяется рассмотрению методов интерференционного радиозондирования, и делается вывод о применимости метода спектрально-поляризационного частотно-пространственно разнесенного приема для исследования динамических процессов в ионосферной плазме.

Показано, что использование спектрального метода для разделения мод отраженного от ионосферы сигнала имеет ограничения по времени наблюдения. Также при применении такого метода становятся неразличимыми моды сигнала с одинаковым доплеровским сдвигом. Использование поляризационного метода обработки в КВ диапазоне затруднено, вследствие многомодовой структуры отраженной радиоволны. Применение спектрально-поляризационного метода восстановления полного вектора поля позволяет соединить преимущества двух методов, но при этом к существенным недостаткам метода можно отнести ограничения на аппаратуру, в частности, размеры антенн существенно меньше длины волны, что приводит к необходимости существенного повышения чувствительности приемников. Поэтому выявлена необходимость модернизации спектрально-поляризационного метода применительно к реальным антеннам с конечными размерами.

Во **второй главе** приведены результаты численного эксперимента, моделирующего распространение радиоволн в ионосфере, проведенного с использованием модели ионосферы IRI. Результат моделирования использован в дальнейшем для сравнения с результатами экспериментальных исследований. Представлен модифицированный спектрально-поляризационный метод, учитывающий изменение фазы радиоволны вдоль приёмной антенны, произведена оценка ошибок, возникающих при использовании

классического и модифицированного спектрально-поляризационного метода, показаны предельные значения достижимых точностей углов прихода радиоволны.

Численный эксперимент был предварительно проведен для условий распространения и радиотрасс, соответствующих дням и радиотрассам, на которых были запланированы экспериментальные исследования. Целью проведения такого численного эксперимента было сравнение полученных результатов с экспериментальными данными. Исследовались две радиотрассы. Первая ориентирована с Севера на Юг, Архангельск – Казань (АК), частота 6160 кГц, протяженность радиотрассы ~1600 км. Вторая ориентирована с Запада на Восток, Москва – Казань (МК), частота 4996 кГц, протяженность радиотрассы ~750 км. В качестве источника зондирующего сигнала для архангельской радиотрассы была использована вещательная станция круглосуточного вещания, имеющая перерыв в работе с 2.30 до 4.00 МДВ. На МК радиотрассе источником сигнала была круглосуточная радиостанция точного времени (РВМ).

Разработана методика определения углов прихода радиоволны на основе модифицированного спектрально-поляризационного метода, которая учитывает набег фазы волны вдоль антенного элемента. Произвести такой учет возможно следующим образом. ЭДС, наведенную на элементы антенной системы, можно записать в матричной форме как скалярное произведение \vec{l} матрицы антенных элементов (в случае точечной антенны, $|l| \ll \lambda$, т.е. линейные размеры антенны много меньше длины волны), составленной из векторов направлений каждого антенного элемента и вектора электрического поля \vec{E} .

$$\vec{l} \cdot \vec{E} = \varepsilon, \quad (1)$$

где $\vec{l} = \begin{bmatrix} l_x^{(1)} & l_y^{(1)} & l_z^{(1)} \\ l_x^{(2)} & l_y^{(2)} & l_z^{(2)} \\ l_x^{(3)} & l_y^{(3)} & l_z^{(3)} \\ l_x^{(4)} & l_y^{(4)} & l_z^{(4)} \end{bmatrix}$, матрица составленная из векторов антенных элементов.

Для того чтобы модернизировать спектрально-поляризационный метод, необходимо отказаться от предположения о том, что приемная антенна точечная, и перейти к реальной антенной системе конечной длины, при этом выражение (1) может быть представлено в следующем виде:

$$\varepsilon = \vec{l} \vec{E} = (\vec{l}, \vec{A}) \cos \omega t + (\vec{l}, \vec{B}) \sin \omega t,$$

где \vec{A} и \vec{B} квадратурные компоненты сигнала.

Для того чтобы решить задачу расчета изменения фазы на конечной по длине антенне, необходимо разбить антенну на малые элементы, и для наведённой ЭДС на такой элемент можно записать выражение:

$$d\varepsilon = (\vec{A}(\vec{r}), d\vec{l}) \cos \omega t + (\vec{B}(\vec{r}), d\vec{l}) \sin \omega t, \quad (2)$$

где \vec{r} – радиус-вектор, проведенный до бесконечно малого участка приемной антенны.

Дальнейший анализ проведен в предположении, что отраженную от ионосферы радиоволну всегда можно разложить на две волны с круговой поляризацией. Поле радиоволны, обладающей круговой поляризацией, можно представить в виде:

$$\vec{A} = A^{(0)} \cos \vec{k} \vec{r} + (-B^{(0)}) \sin \vec{k} \vec{r}, \quad \vec{B} = B^{(0)} \cos \vec{k} \vec{r} + A^{(0)} \sin \vec{k} \vec{r},$$

где $A^{(0)} \perp B^{(0)}$, $|A^{(0)}| = |B^{(0)}|$.

Представляя принятую волну в виде суммы обыкновенной и необыкновенной компоненты, получаем выражения, учитывающие изменение электрического вектора

радиоволны вдоль антенного полотна. Интегрируя вдоль всего элемента антенны от общей точки до длины L в выражении (2), получим два интеграла для скалярных произведений:

$$\int_0^L (\vec{A}(\vec{r}) \cdot d\vec{l}) = (\vec{A}^{(0)} \cdot \vec{l}) \cdot \frac{\sin(\vec{k} \cdot \vec{l})}{(\vec{k} \cdot \vec{l})} - (\vec{B}^{(0)} \cdot \vec{l}) \cdot \frac{1 - \cos(\vec{k} \cdot \vec{l})}{(\vec{k} \cdot \vec{l})}. \quad (3)$$

$$\int_0^L (\vec{B}(\vec{r}) \cdot d\vec{l}) = (\vec{B}^{(0)} \cdot \vec{l}) \cdot \frac{\sin(\vec{k} \cdot \vec{l})}{(\vec{k} \cdot \vec{l})} + (\vec{A}^{(0)} \cdot \vec{l}) \cdot \frac{1 - \cos(\vec{k} \cdot \vec{l})}{(\vec{k} \cdot \vec{l})}. \quad (4)$$

Формулы (3),(4) позволяют решить прямую задачу: определение величины ЭДС при известном значении вектора поля \vec{E} . Однако больший интерес представляет обратная задача, для ее требуется найти значения 12 неизвестных величин. Однако в нашем случае не все переменные независимы, так модуль вектора \vec{k} может быть выражен через длину падающей радиоволны как

$$|\vec{k}| = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda},$$

а параметры комплексной амплитуды (3,4) электрического вектора поля \vec{E} связаны между собой через векторное произведение единичного вектора направления следующим образом:

$$\vec{B}^{(0)} = \vec{A}^{(0)} \times \frac{\vec{k}}{|\vec{k}|}.$$

Эти условия позволяют исключить четыре неизвестных величины, по две для каждой радиоволны с разной поляризацией, а для точного определения 8-и неизвестных параметров $\vec{k}^+, \vec{k}^-, \vec{A}^{(0)+}, \vec{A}^{(0)-}$ необходимо иметь измеренные значения квадратурных коэффициентов как минимум для 4-х антенных элементов. Этим и обусловлен выбор конфигурации антенной системы.

Задача определения параметров радиоволны из уравнений (3,4) относится к классу некорректно поставленных задач. Применяя такой метод к этой задаче с учетом регуляризирующих слагаемых, получим следующий функционал.

$$\|\vec{y}_i - \vec{Y}_i(\vec{k}_i^+, \vec{k}_i^-, \vec{A}_i^{(0)+}, \vec{A}_i^{(0)-})\|^2 + \alpha \cdot \|\vec{k}_i^+ - \vec{k}_i^+\|^2 + \beta \cdot \sum_{m \in \{+, -\}} \left\| \frac{\partial \vec{k}_i^m}{\partial t} \right\|^2 + \gamma \cdot \sum_{m \in \{+, -\}} \left\| \frac{\partial \vec{A}_i^{(0),m}}{\partial t} \right\|^2. \quad (5)$$

В левой части выражения \vec{y}_i представляет собой вектор комплексных амплитуд принятой радиоволны, в то время как функционал $\vec{Y}_i(\vec{k}_i^+, \vec{k}_i^-, \vec{A}_i^{(0)+}, \vec{A}_i^{(0)-})$ является приближенным нормальным решением, изменяя параметры которого, подбираем наиболее подходящее решение.

Искомые параметры $\vec{k}^+, \vec{k}^-, \vec{A}^{(0)+}, \vec{A}^{(0)-}$ получаем минимизацией функционала (5). Дополнительным условием, накладываемым на уравнение (5), является

$$\alpha \cdot \|\vec{k}_i^+ - \vec{k}_i^+\|^2,$$

где α – малый параметр. Необходимость такого условия связана с физической сущностью принимаемого радиосигнала. Моды радиосигнала в среднеширотном приближении не могут сильно отличаться по направлению прихода. Поэтому решения ищутся для близких по направлению радиолучей.

Результаты измерений угла места и азимутального угла 21 ноября 2005 г. на трассе Архангельск-Казань (частота 6160 кГц) представлены на рис.1. Жирной линией представлен суммарный угол без разделения компонент (посчитанный классическим спектрально-поляризационным методом), пунктирной и штрихованной линиями

изображены магнитоионные составляющие с близкими углами прихода, не выделяемые стандартными методами частотно пространственного разнесённого приёма. Следует заметить, что размах вариаций суммарного угла больше, чем разность между полученными компонентами.

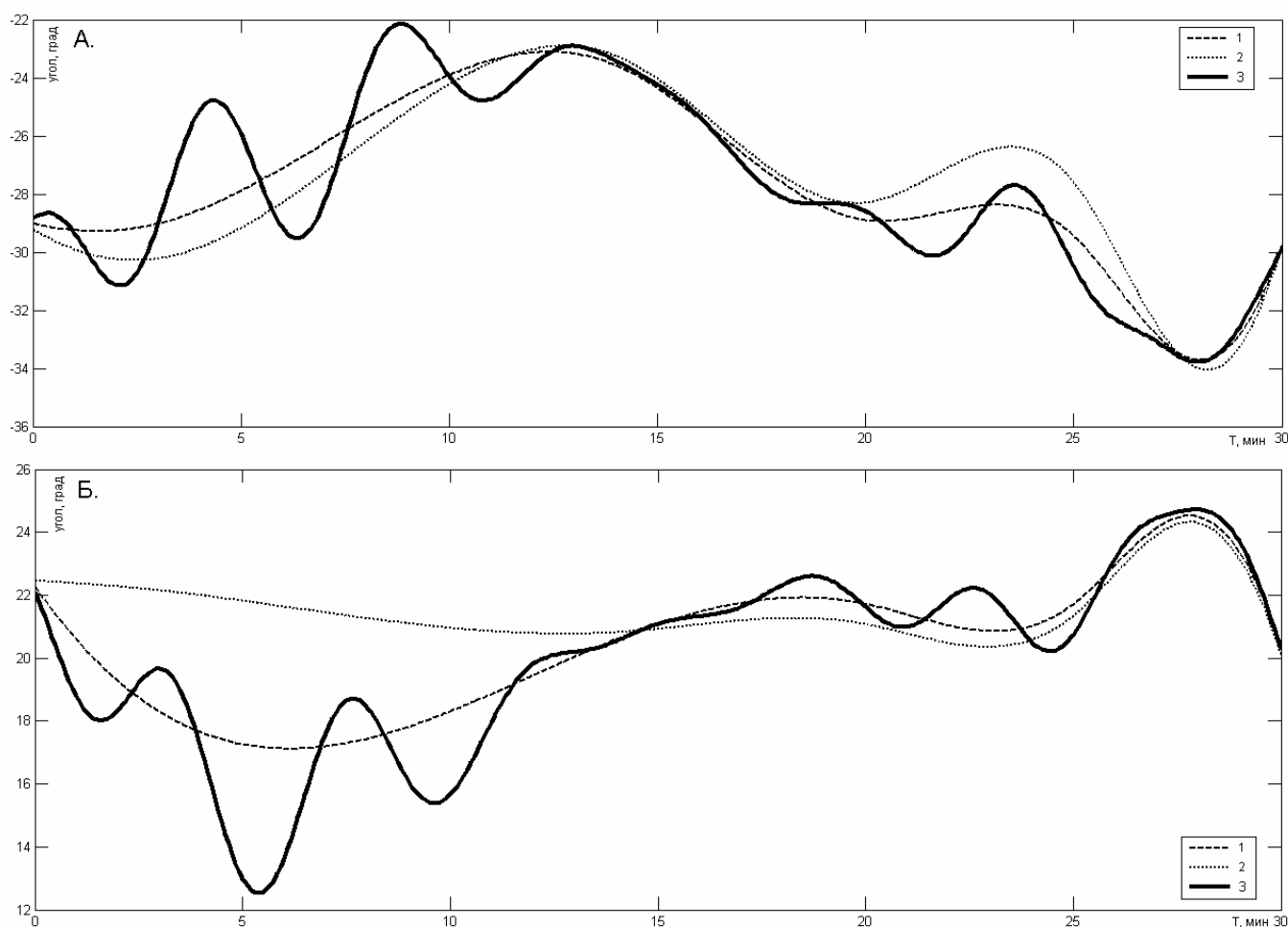


Рис. 1. Зависимость от времени (А) азимутального угла прихода и (Б) угла места, для двух лучей.

Цифрами обозначены: 1- первый луч, 2- второй луч, 3 - суммарное кажущееся колебание углов прихода при отсутствии разделения радиоволны по поляризации .

Данный пример показывает возможность разделения двух магнитоионных компонент принимаемой радиоволны, которые невозможно выделить, используя спектральный доплеровский метод, так как две компоненты не разрешаются в спектральной области. Видно наличие двух составляющих с близкими углами прихода, не выделяемых стандартной доплеровской фильтрацией.

Проанализированы среднеквадратичные ошибки определения углов, полученных модифицированным спектрально-поляризационным методом. Результатом такого моделирования стали оценки предельно достижимых точностей определения углов, представленные на рис. 2. Точности определения углов прихода оказались в среднем выше, чем при использовании спектрально-поляризационного метода в приближении точечной антенны.

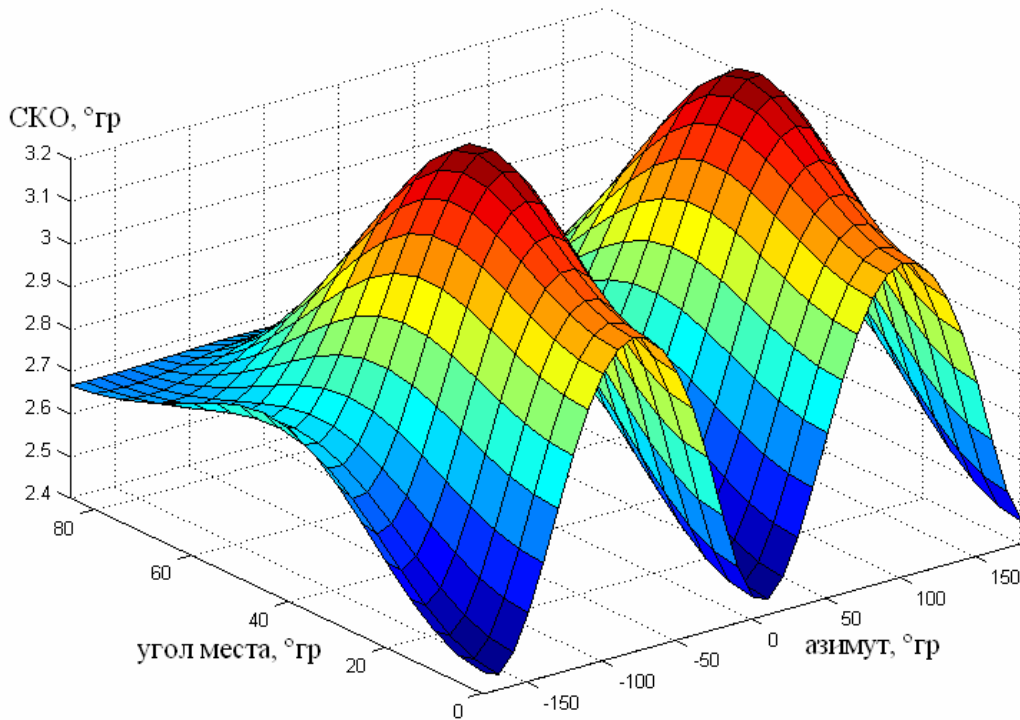


Рис. 2. Зависимость СКО суммарной ошибки определения угла прихода радиоволны от азимутального угла и угла места.

Рассмотрены поляризационные параметры падающей волны, в качестве которых для анализа выбраны направление большой оси эллипса поляризации и обратный коэффициент эллиптичности. Экспериментальное исследование данных параметров поляризации представлено в четвертой главе.

В **третьей главе** приведено описание комплекса наклонного пассивного мониторинга КГУ – доплеровского фазоугломерного комплекса «Спектр». Проанализированы аппаратные возможности комплекса. На основе анализа и с учетом современных требований в главе сформулированы задачи обновления и модернизации комплекса. Это создание новой антенной системы для реализации поляризационного приёма, модернизация системы калибровки, разработка новой цифровой приёмной части, создание системы телеметрии и контроля параметров комплекса, изменение и модернизация алгоритмов автоматической работы комплекса. Детально описываются произведенные нововведения в составе доплеровского фазоугломерного комплекса «Спектр». Блок-схема модернизированного комплекса приведена на рис. 3.

Рассчитана поляризационная антенная система для доплеровского фазоугломерного комплекса «Спектр». Созданная антенная система представляет собой четыре наклонных полувибратора, каждый из которых гальванически не связан с другими полувибраторами и подсоединён к своему приёмному устройству. Верхние концы лучей закреплены на антенной мачте с возможностью изменения высоты подвеса от полутора до восьми метров, а нижние части опираются на прямоугольник со сторонами одиннадцать и шестнадцать метров. Направление юг–север соответствует линии, проведенной между центрами коротких сторон прямоугольника. Использование такой антенной системы делает возможным обработку принимаемого сигнала спектрально-поляризационным методом.

Представлена новая система управления радиоприёмными устройствами, где для связи с управляющим компьютером была использована шина USB. В качестве исполнительного устройства применена микросхема ПЛИС MAX7064S. Новая система

управления РПУ позволяет оперативно, при помощи программного обеспечения изменять настройки приемных устройств.

Разработана новая системы калибровки, которая оформлена в виде отдельного функционального узла доплеровского фазоугломерного комплекса «Спектр» и состоит из следующих узлов: устройства управления, калибровочного генератора на основе системы прямого цифрового синтеза частоты, управляемого усилителя, радиочастотного антенного усилителя, антенны калибратора, четырёх цифро-аналоговых преобразователей и усилителей к ним. В систему калибровки включены цифро-аналоговые преобразователи для независимого управления усилением промежуточной частоты каждого канала четырёхканального радиоприёмного устройства. Применение новой системы калибровки позволяет оперативно и полностью учитывать все фазовые и амплитудные различия для каждого из приёмных трактов четырехканальной приёмной системы.

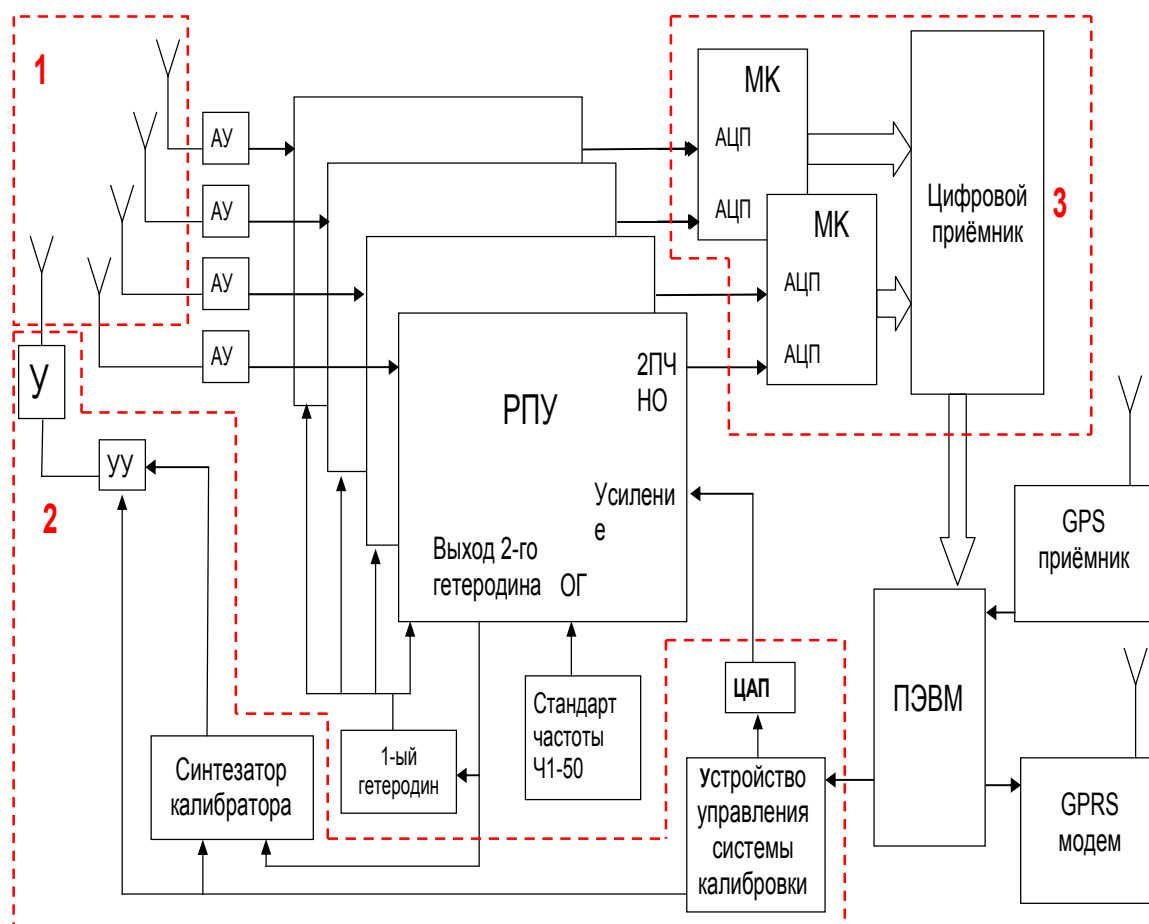


Рис. 3. Блок-схема доплеровского фазоугломерного комплекса «Спектр»

Представлена новая цифровая система сбора и предварительной обработки сигнала – блок цифрового приёма. Одним из основных требований при его создании являлась реализация квадратурного детектирования в цифровой области. Для использования в качестве устройства оцифровки были применены четыре платы начального освоения С8051F064-EVB с микроконтроллером С8051F064, встроенный аналого-цифровой преобразователь (АЦП), который позволяет задавать минимальный временной интервал между двумя последовательными выборками, равный 1 мкс. Для того чтобы реализовать такую возможность, было разработано высокоскоростное четырехканальное устройство, осуществляющее предварительную обработку данных, поступающих с АЦП (микроконтроллера), и последующую выдачу информации на персональный компьютер. Для этих целей была использована система на основе микросхемы Cyclon II фирмы Altera.

В состав устройства, реализованного на микросхеме ПЛИС, входят: интерфейсный блок, блок разделения квадратур, низкочастотный цифровой фильтр, децимирующий фильтр и блок связи с ПК.

Перенос квадратурного детектирования в цифровую область позволяет избавиться от подверженных амплитудным и фазовым нестабильностям довольно сложных, аналоговых подсистем. Таковыми являются: блоки формирователя квадратур, смесителя и блока аналоговых фильтров.

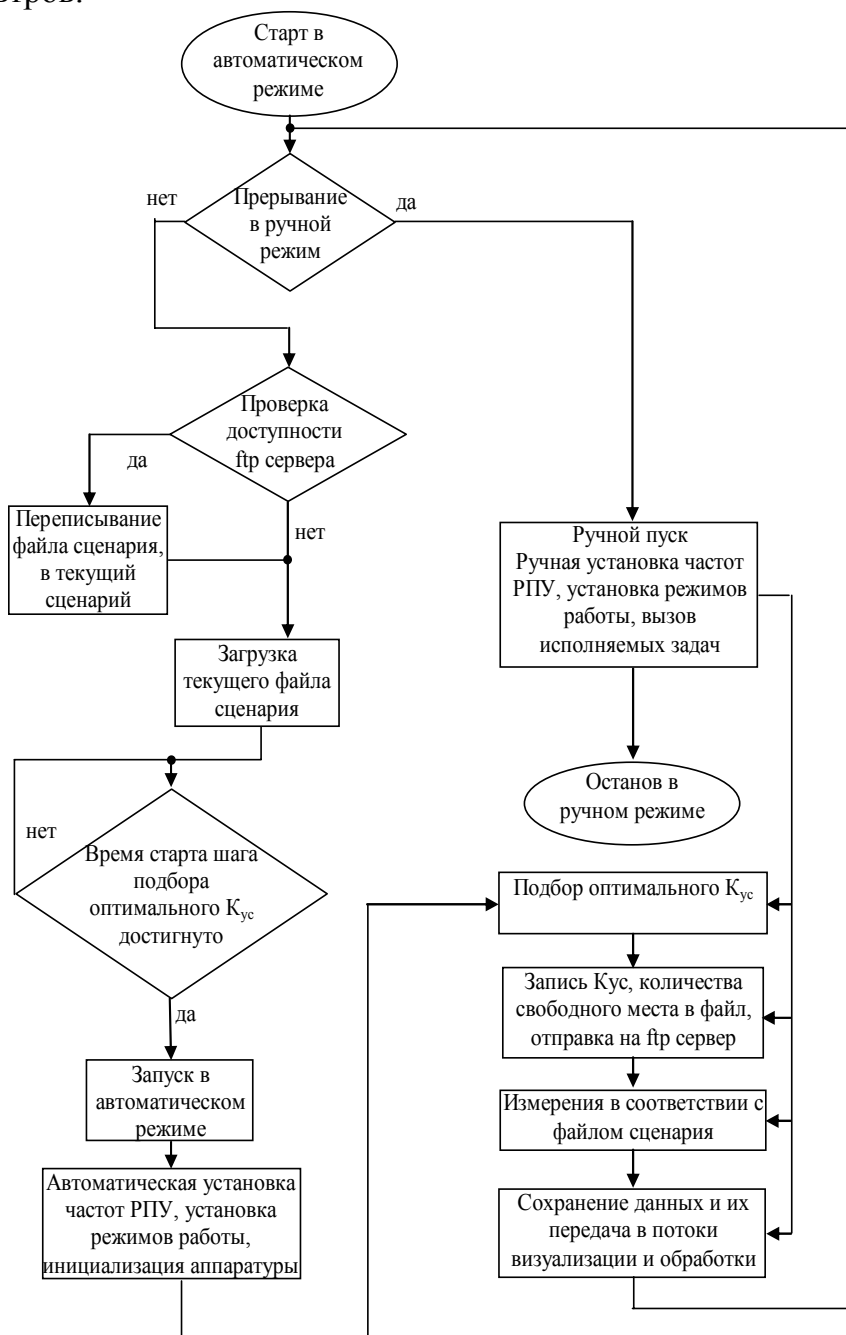


Рис. 4. Блок-схема работы измерительной задачи управляющей программы доплеровского фазоугломерного программного обеспечения комплекса «Спектр»

В ходе проведения длительных циклов измерений на загородном полигоне возникла необходимость увеличить функциональные возможности программного обеспечения доплеровского фазоугломерного комплекса «Спектр». В разделе, посвященном программному обеспечению комплекса, показана модернизация алгоритмов управления комплексом и описано создание системы телеметрии комплекса. Работа основной

измерительной программы была разделена на три отдельные задачи: измерительную, визуализационную и обработки данных. Такое деление позволило оптимизировать работу программы. Взаимодействие между задачами организовано через передачу измеренных данных в конце цикла измерения. Блок-схема измерительной задачи управляющей программы приведена на рис. 4.

Из-за невозможности постоянного присутствия оператора на полигоне возникла необходимость управления и контроля параметров комплекса дистанционно. Для этого в состав комплекса был включен GSM/GPRS модем, задачами которого являются обеспечение беспроводного доступа в сеть Интернет, посылка телеметрической и приём управляющей информации. В качестве телеметрических данных о состоянии комплекса были выбраны: значения кода напряжения на выходах ЦАП, которые управляют коэффициентами усиления промежуточной частоты для каждого из радиоприёмных устройств, и количество свободного места на диске компьютера. Файл с телеметрической информацией автоматически передается с использованием протокола FTP на сервер КГУ.

Вследствие удалённости места расположения комплекса «Спектр» на радиофизическом полигоне КГУ показана необходимость независимого контроля параметров комплекса. Эта задача решена при помощи системы, использующей независимый канал связи.

Модернизация программной части комплекса позволила увеличить срок автономной работы комплекса (до нескольких недель без непосредственного присутствия оператора). Это стало возможным за счет введения отправки телеметрической и приёма управляющей информации, разделения задач измерения, визуализации и обработки данных, а также независимого устройства контроля параметров комплекса с собственным каналом связи.

В **четвертой главе** приведены характерные особенности разработанной для измерений антенной системы, условий проведения эксперимента, а так же полученные результаты исследований.

Приведены описание проведенного эксперимента 2005–2006 годов, характеристики используемых радиотрасс, структура и характер первичных данных, получаемых при помощи доплеровского фазоугломерного комплекса «Спектр», процедура обработки данных. Показаны примеры получаемых многомодовых сигналов.

Представлены результаты измерений мгновенной нормали к волновому фронту падающей радиоволны (значения азимутального угла и угла места). В качестве примера используются данные, полученные на радиотрассе Архангельск – Казань на частоте 6160 кГц 12 ноября 2005 года (на рис. 5). Для расчета были выбраны данные, начиная с 10 часов, так как распространение радиоволн в этот момент имеет ярко выраженный одномодовый характер, о чем можно судить на основании полученного динамического спектра радиосигнала. Результаты обработки были усреднены пятиминутным временным окном. Среднее значение азимутального угла составило -25.5° , а для угла места 34.3° , что согласуется с модельными расчетами. Среднеквадратичное отклонение полученных данных составило $3,9^\circ$ для азимутального угла и $2,2^\circ$ – для угла места.

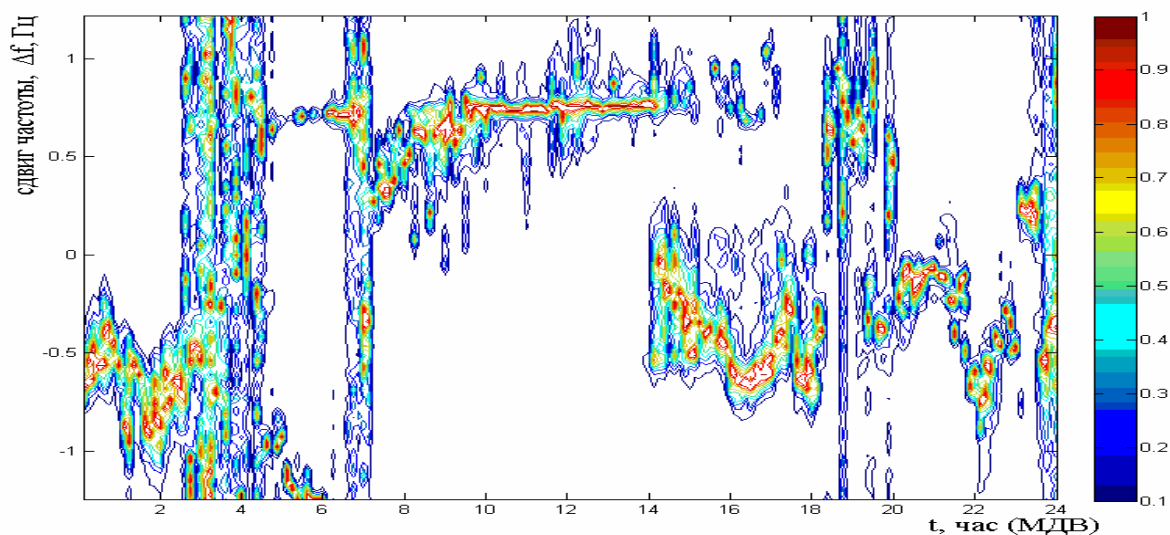


Рис. 5. Суточные изменения энергетического спектра принимаемого радиосигнала для 12 ноября 2005 года, радиотрасса Архангельск – Казань, частота 6160 кГц

Произведен анализ поляризационной картины и вариаций параметров принимаемого радиосигнала. На рис. 6 представлено изменение распределения обратного коэффициента эллиптичности для 10 дней. Положение максимума распределения изменяется не более чем 8% от суток к суткам. В результате спектральной обработки временных рядов обратного коэффициента эллиптичности в спектрах были обнаружены колебания с периодами 10 – 100 минут. Колебания с такими периодами характерны для внутренних гравитационных волн (ВГВ). При этом следует учитывать, что коэффициент эллиптичности показывает фактически соотношение амплитуд двух волн с разнонаправленными круговыми поляризациями.

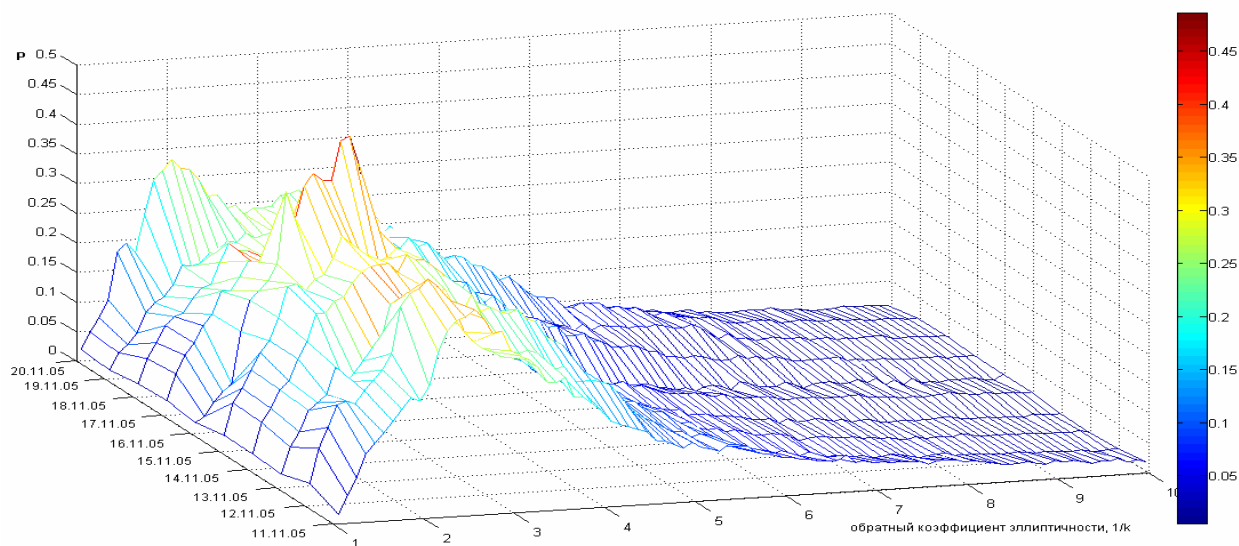


Рис. 6. Распределение обратного коэффициента эллиптичности на радиотрассе Архангельск – Казань за 10 суток (6160 кГц)

В спектре обратного коэффициента эллиптичности хорошо прослеживаются вариации с периодами 90, 60, 35 и менее минут (рис. 6а). Энергия долгопериодных колебаний больше, чем короткопериодных как минимум на один порядок. Подобные колебания легко обнаруживаются и при спектральном анализе временных рядов угла места (рис. 6б).

Представленные на рисунках спектры рядов данных имеют приближенно степенной характер начиная с 8 – 10 минутных периодов.

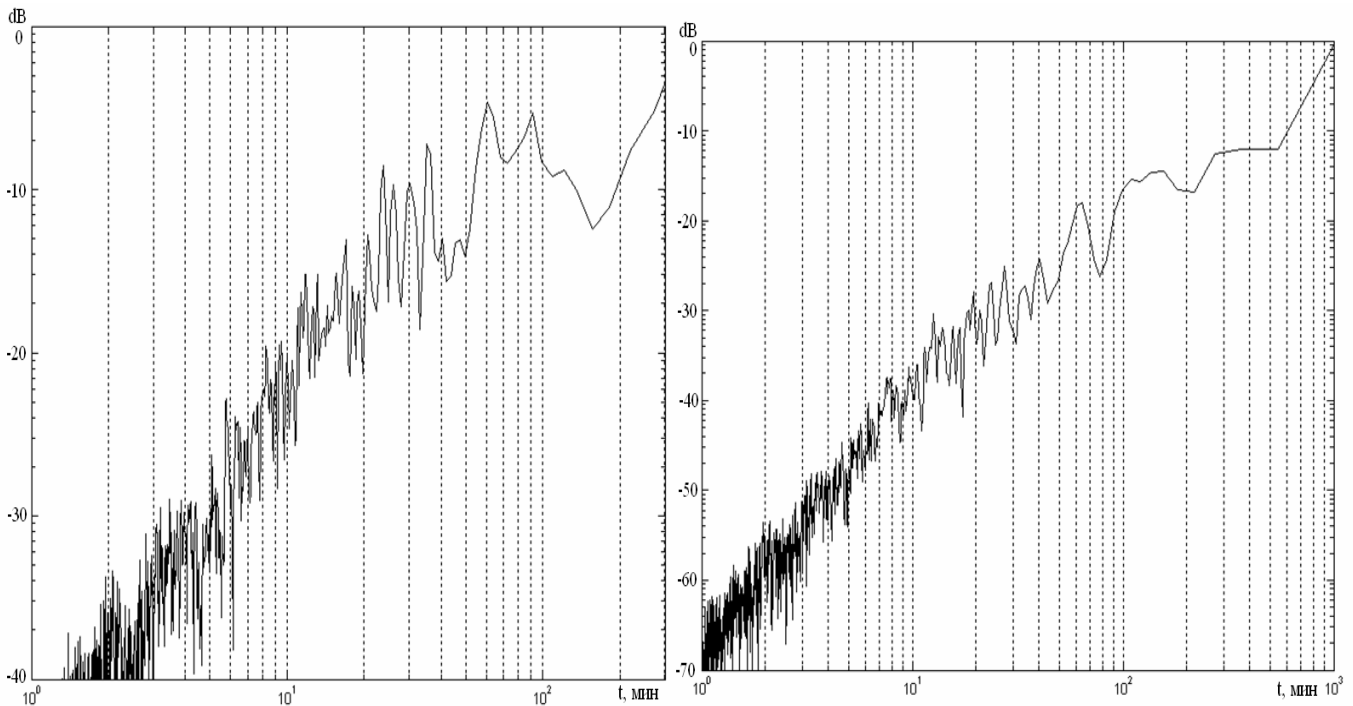


Рис. 6. Динамический спектр: а) вариаций обратного коэффициента эллиптичности; б). вариаций угла места

В **заключении** перечислены основные выводы, полученные в диссертационной работе.

1. Разработан модифицированный спектрально-поляризационный метод исследования радиоволн. Данный метод позволяет выделять поляризационные компоненты радиосигнала, не разделяемые при использовании спектрально-доплеровского метода из-за невозможности разрешить их в спектральной области, что позволяет увеличить точность измерения углов прихода радиоволны и увеличить информативность регистрируемых параметров принимаемого радиосигнала. Это стало возможно на основе учёта изменения фазы принимаемой радиоволны на конечной длине приёмной антенны, в отличие от классического метода.
2. Разработана методика определения погрешности углов прихода радиоволны, как для классического, так и для модифицированного спектрально-поляризационного метода. Показано, что при использовании модифицированного спектрально-поляризационного метода, учитывающего конечные размеры антенны, СКО определения углов прихода в 2 раза ниже, чем при использовании классического, и составляют 2–3° и 4–5° соответственно.
3. Разработана методика определения углов прихода радиоволны для модифицированного спектрально-поляризационного метода, которая позволила получить параметры принимаемого радиосигнала не хуже, чем при использовании спектрально-доплеровского метода. К существенным преимуществам этой методики можно отнести то, что наряду с угловыми параметрами принимаемой радиоволны в результате обработки получаются и параметры поляризации радиоволны.
4. Создан автоматический программно-аппаратный угломерный комплекс для пассивного дистанционного мониторинга параметров ионосферы. Обработка принятого сигнала

осуществляется модифицированным спектрально-поляризационным методом. В комплексе произведены следующие изменения:

- разработана и создана поляризационная антенная система, размеры которой сравнимы с длиной принимаемой радиоволны, представляющая собой четыре наклонных антенных луча, каждый из которых гальванически не связан с другими лучами и подсоединён к своему приёмному устройству;
 - разработан многоканальный цифровой приёмный модуль, построенный на базе аналого-цифрового преобразователя и микросхемы программируемой логики. Данный приёмный комплекс реализует квадратурную обработку сигнала, последующую фильтрацию и децимацию радиосигнала для каждого канала в отдельности, что позволяет исключить дополнительные фазовые искажения в приёмном тракте многоканальной радиоприёмной системы;
 - разработана и внедрена методика удаленного управления комплексом, позволяющая осуществлять оперативный мониторинг и управление комплексом по двум независимым GSM/GPRS каналам. При этом управление комплексом дистанционно дало возможность: изменять схемы-сценарии работы комплекса, изменять частоту радиоприёма на конкретном радиоприёмном устройстве, перезагружать программное обеспечение комплекса и оперативно наблюдать за параметрами комплекса.
5. Показана возможность использования модифицированного спектрально-поляризационного метода для анализа происходящих в ионосфере процессов. Метод применен для обработки измерений полученных, в результате длительного дистанционного зондирования ионосферы сигналами вещательных радиопередаточных станций. Это позволило получить следующие результаты: среднеквадратичное отклонение определения углов прихода радиолуча для азимутального угла и угла места не превышает 4° и 2° соответственно. Отклонение от расчетных углов прихода радиоволны составляет $5-7^\circ$, при этом следует обратить внимание на два фактора: модель ионосферы (IRI) не учитывает большого количества случайных параметров, а погрешность определения ориентировки измерительной приёмной антенны не превышает 5° . Метод был опробован для различных условий, как для спокойной ионосферы, так и неустойчивой – в восходно-заходные часы. В результате обработки данных поляризационной картины получены вариации обратного коэффициента эллиптичности и направления большой полуоси эллипса поляризации с периодами от 10–20 минут до 2-х часов. В спектре колебаний углов прихода радиоволны, коэффициента эллиптичности наблюдаются вариации с временами, характерными для внутренних гравитационных волн.

Благодарность

Автор выражает огромную благодарность первому научному руководителю Теплому Вадиму Юрьевичу за неоценимый практический опыт и знания полученный под его руководством, а также научному коллективу лаборатории ионосферных исследований: руководителю О.Н. Шерстюкову, В.В. Бочкареву, И.Р. Петровой, а так же всем кто оказал помощь в работе над диссертацией.

Основные публикации по теме диссертации.

1. Латыпов Р.Р., Бочкарев В.В., Дрешер А.М., Петрова И.Р. Система автоматического управления и контроля доплеровского фазоугломерного комплекса наклонного зондирования ионосферы «Спектр» // Ученые записки Казанского государственного университета.– Казань: Изд-во КГУ, 2008.– Т150.– Кн. 3.– С.13–22.
2. Latypov R. R., Bockkarev V. V., Petrova I. R., and Teplov V. Yu. Calibration system of HF multichannel radio receiver system // Proc. SPIE.– 2006.– 6522.– 65222G.– (8 pages).
3. Теплов В.Ю., Бочкарев В.В., Латыпов Р.Р., Петрова И.Р. Разделение магнитоионных компонент в доплеровских фазоугломерных измерениях КВ-диапазона // Известия вузов Физика. Приложение. – 2006. – №3.–С.258–259.
4. Бочкарев В.В., Латыпов Р.Р., Петрова И.Р., Теплов В.Ю. Применение цифрового ЛЧМ-ионозонда в многоканальном комплексе наклонного зондирования ионосферы Казанского государственного университета // Байкальская школа по фундаментальной физике: доклады(Иркутск, 13–17 сентября 2004г.). – Иркутск: ИСЗФ СО РАН, 2004 – С.91–93.
5. Латыпов Р.Р., Бочкарев В.В., Петрова И.Р., Теплов В.Ю. Частотное обеспечение многоканальной радиоприёмной системы // Международная Байкальская молодёжная научная школа по фундаментальной физике: труды IX Конференция молодых учёных «Физические процессы в космосе и околоземной среде». – Иркутск: ИСЗФ СО РАН, 2006.– С.136–139.
6. Латыпов Р.Р., Бочкарев В.В., Петрова И.Р., Теплов В.Ю. Управление РПУ Р399 с использованием универсальной последовательной шины USB // Излучение и рассеяние ЭМВ: труды междунар. конф. (Таганрог, 20 – 25 июня 2005г.). – Таганрог, 2005. – С.421– 422.
7. Латыпов Р.Р., Бочкарев В.В., Петрова И.Р. Универсальный модуль цифрового приёмника // Международная Байкальская молодёжная научная школа по фундаментальной физике: труды X Конференция молодых учёных «Современные проблемы в астрофизике и физике космической плазмы». – Иркутск: ИСЗФ СО РАН, 2007.– С. 153–155.
8. Латыпов Р.Р., Бочкарев В.В., Петрова И.Р., Теплов В.Ю. Цифровой синтезатор частоты в качестве гетеродина радиоприёмного устройства // Материалы V международной школы молодых ученых и специалистов «Физика окружающей среды».– Томск: Изв-во ИОА СО РАН, 2006.– С. 86 – 90.
9. Латыпов Р.Р., Бочкарев В.В., Петрова И.Р. Развитие аппаратной части доплеровского фазо-угломерного комплекса «Спектр» //Излучение и рассеяние электромагнитных волн ИРЭМВ–2007: труды конференции. – Таганрог: Изд-во ТИ ЮФУ, 2007.–Т.2.– С.116–121.
10. Латыпов Р.Р., Бочкарев В.В., Петрова И.Р. Использование спектрально поляризационного метода в измерениях на доплеровском фазоугломерном комплексе «Спектр» // Волновые процессы в средах: сборник докладов Поволжской региональной молодежной конференции.– Казань: Изд-во КГУ, 2007.– С. 56–59.
11. Латыпов Р.Р., Бочкарев В.В., Петрова И.Р., Теплов В.Ю. Применение цифрового ЛЧМ-ионозонда в многоканальном комплексе наклонного зондирования ионосферы Казанского государственного университета // Тезисы докладов Байкальской школы по фундаментальной физике (Иркутск, 13-17 сентября 2004г.). – Иркутск: ИСЗФ СО РАН, 2004г – С. 26–27.
12. Латыпов Р.Р., Бочкарев В.В., Петрова И.Р., Теплов В.Ю. Частотное обеспечение многоканальной радиоприёмной системы// Международная Байкальская молодёжная научная школа по фундаментальной физике: тезисы IX Конференции молодых учёных

«Физические процессы в космосе и околоземной среде». – Иркутск: ИСЗФ СО РАН, 2006.– с.35.

13. Latypov R. R., Bochkarev V. V., Petrova I. R., and Teplov V. Yu. Calibration system of HF multichannel radio receiver system // XIII International Symposium “Atmospheric and Ocean Optics. Atmospheric Physics”: abstracts. – Томск: ИОА СО РАН, 2006.– С.195.

14. Латыпов Р.Р., Бочкарев В.В., Петрова И.Р. Система автоматического контроля параметров доплеровского фазоугломерного комплекса «Спектр» // Физика и технические приложения волновых процессов: тезисы докладов VI международной научно-технической конференции. – Казань, 2007.– С.60–61.

15. Latypov R. R., Bochkarev V. V., Petrova I. R. Ionospheric research with help of doppler goniometric complex «Spectr» // IRI/COST 296 Workshop. Abstracts. – Prague, 2007.– P.53.

16. Латыпов Р.Р., Бочкарев В.В., Петрова И.Р. Универсальный модуль цифрового приёмника //Международная Байкальская молодёжная научная школа по фундаментальной физике: тезисы X конференция молодых учёных «Современные проблемы в астрофизике и физике плазмы. – Иркутск: ИСЗФ СО РАН, 2007. – С. 49.