

исследований солнечного ветра и активных ядер галактик на РСДБ-сети LFVN с использованием системы регистрации S2. // Известия вузов. Радиофизика, 2007, Т.1, N4, с.275-299.

5. Татарский В.И. Распространение волн в турбулентной атмосфере. – М., 1967 г. 548 с.

6. Абрамов В.И., Антипенко А.А., Дементьев А.Ф., Дугин Н.А., Нечаева М.Б., Снегирев С.Д., Тихомиров Ю.В., Формозов Б.С. Радиointерферометр с независимым приёмом для солнечных исследований. Приёмный комплекс // Препринт № 523. – Нижний Новгород: ФГНУ НИРФИ. 2008 – 28с.

7. Антипенко А.А., Дементьев А.Ф., Дугин Н.А., Нечаева М.Б., Снегирев С.Д., Тихомиров Ю.В., Шмелд И., Безруков Д., Коноваленко А.А. РСДБ-комплекс для исследований радиоизлучения Солнца. // Всероссийская астрономическая конференция ВАК-2010 «От эпохи Галилея до наших дней», п. Нижний Архыз, 12-19 сентября 2010. Тезисы докладов. С.20.

8. Беликович В.В., Грач С.М., Караштин А.Н., Котик Д.С., Токарев Ю.В. Стенд «Сура»: Исследования атмосферы и космического пространства (обзор) // Изв. ВУЗов. Радиофизика. 2007. Т. 50. С. 545-576.

9. Белов И.Ф., Бычков В.В., Гетманцев Г.Г., Митяков Н.А., Пашкова Г.Р. Экспериментальный комплекс СУРА для исследования искусственных возмущений ионосферы. // Препринт НИРФИ № 167. Горький. 1983.

10. Кузнецова Н. А., Дугин Н. А. Каталог радиоисточников для антенных и интерферометрических измерений. – Горький: НИРФИ. 1988.

11. Ковалев Ю.А., Жеканис Г.В., Ковалев Ю.Ю., Нижельский Н.А., Цыбулев П.Г., Лисаков М.М., Войцик П.А. 100 сильных компактных радиоисточников для круглогодичного тестирования параметров больших радиотелескопов по измерениям на РАТАН-600. // Всероссийская астрономическая конференция ВАК-2010 «От эпохи Галилея до наших дней», п. Нижний Архыз, 12-19 сентября 2010. Тезисы докладов. С. 32.

12. S.M. Grach, V.M. Fridman, L.M. Lifshits, T.S. Podstrigach, E.N. Sergeev, S.D. Snegirev. UHF electromagnetic emission stimulated by HF pumping of the ionosphere. //Annales Geophysicae. European Geophysical Society. 2002. V. 20. PP. 1-5.

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
**Федеральное государственное научное учреждение**  
**«Научно-исследовательский радиофизический институт»**  
**(ФГНУ НИРФИ)**

## **Препринт № 539**

Применение метода  
радиointерферометрии со сверхдлинной базой  
для исследований пространственно-временной  
структуры турбулентности области ионосферы,  
возмущённой мощным радиоизлучением  
(теория, подготовка экспериментов)

В. Г. Гавриленко  
Н. А. Дугин  
М. Б. Нечаева

**Нижний Новгород**

**2011**

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА РАДИОИНТЕРФЕРОМЕТРИИ  
СО СВЕРХДЛИННОЙ БАЗОЙ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ  
ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ СТРУКТУРЫ  
ТУРБУЛЕНТНОСТИ ОБЛАСТИ ИОНОСФЕРЫ, ВОЗМУЩЁННОЙ  
МОЩНЫМ РАДИОИЗЛУЧЕНИЕМ (ТЕОРИЯ, ПОДГОТОВКА  
ЭКСПЕРИМЕНТОВ). //

Препринт № 539. – Нижний Новгород, ФГНУ НИРФИ, 2011. – с. 24

УДК 524.6-77

В работе рассматривается задача дистанционного исследования ионосферы Земли в спокойном и искусственно возмущённом состояниях методом радиоинтерферометрии со сверхдлинной базой (РСДБ) с целью получения информации о параметрах турбулентности (временном и пространственном масштабе плазменных неоднородностей, интенсивности турбулентных пульсаций и т.д.).

Проведён теоретический анализ сигнала интерферометра при исследовании области искусственной ионосферной турбулентности в случае, когда излучение на разных трассах испытывает существенно различное воздействие турбулентной среды.

Представлена структура РСДБ-комплекса, созданного на базе антенн РТ-14 в РАО ФГНУ НИРФИ «Старая Пустынь», РТ-15 в РАО ФГНУ НИРФИ «Зимёнки» и РТ-32 «Ирбене» (Вентспилс, Латвия). Указаны особенности планирования экспериментов по исследованию параметров искусственно возмущённой области ионосферы на сети РСДБ при нагреве ионосферы излучением стенда ФГНУ НИРФИ СУРА. Проведён отбор калибровочных радиоисточников, рассмотрена возможность использования сигналов космических аппаратов (КА) СРНС ГЛОНАСС и НАВСТАР для зондирования ионосферы.

Описаны первые пробные эксперименты по измерению характеристик искусственно возмущённой области ионосферы как на одиночной антенне, так и на трёхэлементной РСДБ-сети. Полученные данные являются основой для планирования дальнейших экспериментов и расширения числа задач теоретического анализа проблемы.

© Научно-исследовательский радиофизический институт, 2011

Дополнительным преимуществом использования сигналов КА СРНС является исследование влияния ионосферы на точность навигационных определений СРНС, что поможет повысить эффективность их работы. Однако, для этого необходимо исследовать структуру передаваемого КА навигационного сообщения, меняющегося во времени по амплитуде, для того чтобы оценить эффективность выделения влияния ионосферных возмущений и отработать методику измерений.

Полученные результаты являются основой для планирования дальнейших экспериментов и расширения числа задач теоретического анализа проблемы.

Авторы благодарят сотрудников лаборатории РСДБ ФГНУ НИРФИ и радиоастрономических обсерваторий «Старая Пустынь», «Зимёнки» и Вентспилского международного радиоастрономического центра (VIRAC) за участие в экспериментах, а также А. Н. Караштина и Г. П. Комракова за помощь в организации работы стенда СУРА.

Работа поддержана РФФИ (грант № 10-02-00875).

### Литература

1. В.И. Алтунин, А.Ф. Дементьев, Б.Н. Липатов, М.Б. Нечаева, В.А. Окмянский, С.Д. Снегирев, Ю.В. Тихомиров. Исследования неоднородностей плазмы солнечного ветра методом РСДБ на длинах волн 18 и 92 см в 1994-1996 гг. // Известия вузов. Радиофизика, 2000 г., Т. XLIII, №3, с. 197-206.
2. Гавриленко В.Г., Липатов Б.Н., Нечаева М.Б. Анализ отклика радиоинтерферометра со сверхдлинной базой на излучение радиоисточника, прошедшее через околосолнечную плазму. // Известия вузов. Радиофизика, 2002 г., XLV, №6, с. 459-472.
3. В.А. Алимов, В.Г. Гавриленко, Б.Н. Липатов, М.Б. Нечаева. О форме частотного спектра флуктуирующего излучения при интерферометрическом приёме в экспериментах по радиозондированию Солнечной короны. // Известия вузов. Радиофизика, 2004, Т. XLVII, N3, с. 167-180.
4. В. Г. Гавриленко, М. Б. Нечаева, А. Б. Пушкарев, И. Е. Молотов, Дж. Туккари, А. С. Чеботарев, Ю. Н. Горшенков, В. А. Самодуров, Ш. Хонг, Дж. Куик, Ш. Доугхерти, С. Анантакришнан. Результаты теоретических и экспериментальных

Результаты экспериментов показали, что в дальнейшем особое внимание нужно уделить процедуре планирования эксперимента в части, касающейся выбора радиисточников для просвечивания ИИТ. Из оценок следует, что в связи с конфигурацией комплекса и чувствительностью аппаратуры можно использовать очень ограниченное число подходящих радиисточников. Кроме того, в условиях повышенной солнечной активности, которая наблюдалась в 2010 году и продолжится в ближайшие годы, желательно принимать сигналы значительно более мощных источников. Для расширения числа наблюдаемых радиисточников предполагается исследовать возможность использования сигналов передатчиков космических аппаратов спутниковых радионавигационных систем (СРНС) ГЛОНАСС и НАВСТАР для зондирования ионосферы. Радиотелескопы ФГНУ НИРФИ оборудованы аппаратурой для приёма сигналов в диапазоне 1.6 ГГц, в котором работают СРНС. Кроме мощного сигнала, позволяющего получить очень хорошее отношение сигнал/шум на выходе приёмника, число КА достаточно велико, а траектории движения разнообразны. Оценки показывают, что в течение суток может быть около 10-15 проходов КА ГЛОНАСС и НАВСТАР в направлении возмущённой области для Старой Пустыни, и следовательно, 4–6 пролетов в дневное время. Существенным преимуществом работы на частоте 1.6 ГГц является отсутствие помех в пункте Зимёнки, где работа на 327 и 610 МГц крайне затруднена из-за сложной помеховой обстановки.

Доступность для наблюдений КА позволяет провести исследование ионосферы Земли в спокойном состоянии и в естественном возмущённом состоянии (например, при мощном выбросе в ионосферу заряженных частиц в результате солнечной вспышки) при задействовании комплекса РСДБ с различными базами. Так как размер проекции базовой линии на фронт волны определяет максимальный масштаб неоднородностей, к которым чувствителен данный интерферометр, то при такой конфигурации РСДБ-комплекса возможно исследовать среднемасштабные неоднородности, протяжённостью несколько десятков километров на базе Зимёнки – Старая Пустынь (70 км), и крупномасштабные неоднородности с размерами до 1500 км. Исследование неоднородностей различных масштабов интересно тем, что крупномасштабные и среднемасштабные неоднородности сильно различаются между собой по механизму генерации, динамическим характеристикам, времени возникновения.

## Введение

В данной работе рассматривается задача экспериментального исследования ионосферы Земли при просвечивании её радиоизлучением удалённых источников и приёмом сигналов радиоинтерферометром со сверхдлинной базой (РСДБ). Метод основан на измерении взаимной когерентности полей излучения, прошедшего через возмущённую среду по разным трассам от радиисточника (искусственного или естественного) до разнесённых между собой антенн интерферометра. Особенность применяемого метода состоит в том, что при РСДБ-приёме диагностика среды может осуществляться при просвечивании её как широкополосным шумовым излучением естественных радиисточников, так и монохроматическими сигналами искусственных излучателей космических аппаратов. Процедура обработки сигналов, характерная для РСДБ, позволяет исключить собственные флуктуации излучения источника и исследовать только относительные возмущения, вносимые средой на 2-х различных трассах распространения. При этом размер проекции базовой линии на фронт волны определяет максимальный масштаб неоднородностей, к которым чувствителен данный интерферометр. Движение неоднородностей или изменение их интенсивности отображаются в спектральном составе сигнала интерферометра.

Ранее метод радиопросвечивания, дополненный РСДБ-приёмом, был применён для исследования плазмы солнечного ветра [1-4]. Теоретическое рассмотрение отклика интерферометра на излучение шумового радиисточника, прошедшее через турбулентную нестационарную среду, показало необходимость использования неквазистатического анализа методом нестационарной геометрической оптики с учетом как фазовых, так и амплитудных флуктуаций поля волны для расчета спектрально-корреляционных характеристик сигнала. Проведенный анализ спектра мощности отклика интерферометра на излучение шумового радиисточника после его распространения в турбулентной среде с крупномасштабными и мелкомасштабными неоднородностями показал, что спектр сигнала радиоинтерферометра должен качественно меняться в зависимости от интенсивности флуктуаций проходящего излучения. В случае слабых фазовых флуктуаций выходной сигнал интерферометра несет информацию о скорости

Таблица 5

Начало скана	Конец скана	Источник	Пункт, принимающий возмущённое излучение	Интервалы излучения
04:25:00	04:35:00	3С287	Ирбене	04:25:00 - 05:20:00
04:45:00	05:05:00	3С295	Старая Пустынь	
05:10:00	05:25:00	3С280	Зимёнки	
06:40:00	07:00:00	3С295	Зимёнки	06:45:00 - 07:00:00
08:25:00	08:45:00	3С380	Старая Пустынь	08:30:00 - 08:45:00
10:20:00	11:00:00	3С380	Зимёнки	10:25:00 - 10:40:00

движения неоднородностей и показателе пространственного спектра флуктуаций электронной концентрации в области масштабов, сравнимых с длиной базы интерферометра. В случае сильных фазовых возмущений возможна интерпретация крупномасштабной пространственной структуры электронной концентрации по относительному уширению спектральных откликов интерферометра на излучение, прошедшее через зоны повышенной турбулентности и зоны, свободные от возмущений.

В процессе разработки методических основ дистанционной диагностики турбулентной среды предложено применить метод радиопросвечивания в комбинации с РСДБ-приёмом для исследования хаотических неоднородностей нестационарной ионосферной плазмы, возникающих под воздействием мощного коротковолнового излучения. Поскольку интерферометрические исследования ионосферы методом РСДБ ранее не проводились, потребовался теоретический анализ статистических характеристик сигнала интерферометра в случае, когда интенсивность плазменной турбулентности на разных трассах сильно различается. На основе этого расчета будет разработана методика получения информации о параметрах искусственной ионосферной турбулентности (ИИТ) по экспериментальным данным.

Экспериментальная часть работы включает цикл радиоинтерферометрических измерений на радиотелескопах в РАО ФГНУ НИРФИ «Старая Пустынь» (РТ-14) и «Зимёнки» (РТ-15), а также на РТ-32 «Ирбене» Вентспилсского международного радиоастрономического центра (VIRAC, Латвия). Воздействие на ионосферу осуществляется нагревным стендом СУРА (ФГНУ НИРФИ), предназначенным для мониторинга верхней атмосферы Земли на основе контролируемых воздействий на нее мощным коротковолновым радиоизлучением.

## 1. Теоретические исследования

РСДБ-эксперимент по исследованию ионосферы методом радиопросвечивания несколько отличается от подобных экспериментов по исследованию космических сред. В ходе экспериментов излучение удаленного космического радиосточника дециметрового диапазона, прошедшего через область искусственной турбулентности, принимается РСДБ-комплексом. При этом излучение, принятое одним из радиотелескопов, испытывает сильные

В центре обработки в ФГНУ НИРФИ при выполнении корреляционной и спектральной обработки полученных данных возникли проблемы с получением достоверных результатов из-за мощной шумовой бури на Солнце 27-30 октября, которая сильно увеличила уровень помехового сигнала. Данное обстоятельство требует учёта солнечной активности при подготовке и проведении дальнейших экспериментов.

## Заключение

В рамках работы начаты теоретические исследования отклика интерферометра при измерении широкополосного сигнала, прошедшего область ИИТ. Проведён анализ статистических характеристик сигнала интерферометра для случая, когда интенсивность плазменной турбулентности сильно различается на трассах распространения сигнала от наблюдаемого источника.

Выполнена подготовка пунктов РСДБ-сети к работе по программе исследований пространственно-временной структуры турбулентности возмущённой мощным радиоизлучением области ионосферы на трёх частотах. Отработана методика составления оптимальных программ наблюдений, исходя из геометрии комплекса «сеть РСДБ – стенд СУРА». Проведена первая пробная серия экспериментов по измерению характеристик искусственно возмущённой области ионосферы как на одиночной антенне, так и на трёхэлементной РСДБ сети.

Сильное повышение среднего уровня вызвано прохождением через диаграмму направленности галактической плоскости с большой яркостной температурой фона. Несовпадение трёх кривых требует подробного анализа, который будет проведён в дальнейшем.

На рис. 3 и 4 приведены фрагменты записей сигнала от возмущенной области во временных интервалах 11-12 часов, когда стенд работал оба дня, и 13-14 часов, когда стенд работал только 6 сентября 2010 года (сплошная линия). Режим работы передатчиков: 1 минута излучения – 2 минуты перерыв. Из приводимых записей видно, что в данном эксперименте трудно выявить влияние искусственного воздействия на параметры излучения ионосферы. Из графиков видно наличие импульсных помех, которые могут исказить данные.

В октябре 2010 года было проведено три РСДБ-эксперимента на частоте 327 МГц с участием радиотелескопов в Старой Пустыни (РТ-14) и Зимёнках (РТ-15), а также РСДБ-пункта «Ирбене» (РТ-32):

– эксперимент NIRFI10.2 состоялся в период 2 – 8 октября 2010 года на РСДБ ФГНУ НИРФИ «Зимёнки – Старая Пустынь»;

– эксперимент NIRFI10.3 состоялся в период с 13 по 15 октября 2010 года с задействованием радиотелескопов РТ-14 (Старая Пустынь) и РТ-32 (Ирбене),

– эксперимент NIRFI10.4 состоялся в период с 28 по 29 октября 2010 года с задействованием радиоинтерферометра ФГНУ НИРФИ «Зимёнки – Старая Пустынь» и РТ-32 «Ирбене».

Во время эксперимента NIRFI10.4 осуществлялось воздействие на ионосферу с помощью стенда СУРА в режиме непрерывного излучения. Мощность излучения составляла около 500 кВт. Излучение удалённого космического радиоисточника распространялось через область искусственной турбулентности и принималось одним из телескопов комплекса. Излучение до двух других радиотелескопов распространялось через область слабой турбулентности или через зону, свободную от возмущений.

В проведённых экспериментах регистрация выполнялась в полосе приёма 2 и 8 МГц в пунктах «Зимёнки» и «Старая Пустынь» и 2 МГц в пункте «Ирбене» параллельно с помощью двух систем регистрации.

Пример графика эксперимента приведён в таблице 6. В трёх экспериментах стенд был задействован в течение 3 часов (суммарное время), в течение которых через нагревную зону наблюдались 6 радиоисточников последовательно всеми тремя РСДБ пунктами.

амплитудные и фазовые флуктуации, а остальные радиотелескопы принимают относительно слабо возмущённое ионосферой радиоизлучение. Взаимно-корреляционная обработка принятых сигналов и дальнейший спектральный анализ позволит получить новую информацию о пространственно-временной структуре возмущённой ионосферной плазмы. Для контроля предполагается проводить эксперименты при том же взаимном положении источников и приёмников, но в отсутствие работы нагревного стенда.

Проанализируем отклик интерферометра на сигнал удалённого радиоисточника, прошедший через область искусственной ионосферной турбулентности. Процедура приёма и преобразования сигналов можно описать следующим образом. Сигнал, поступающий на первый приёмный пункт интерферометра, представим в комплексном виде:

$$E_1(t) = \frac{E_0}{2} [e^{i\Phi_1(t)} + e^{-i\Phi_1(t)}] \quad (1)$$

где  $E_0 = const$ ,

$$\Phi_1(t) = \phi_1(t) + \psi(t) \quad (2)$$

– случайный набег фазы. Он состоит из двух частей:  $\psi(t)$  – включает в себя регулярный набег фазы на однородной трассе от источника до первого приёмника и флуктуации фазы шумового излучаемого сигнала;  $\phi_1(t)$  – дополнительный случайный набег фазы, вызванный пульсациями скорости из-за флуктуаций электронной концентрации, возникающих в области искусственной турбулентности на пути от источника до первого приёмного пункта. В выражении (1) не учтены амплитудные флуктуации сигнала, что оправдано, имея в виду дальнейшее ограничение по амплитуде при обработке принятого сигнала. Предположим, что сигнал от радиоисточника до второго РСДБ-пункта распространяется в невозмущённой области ионосферы. Тогда фаза сигнала, принимаемого во втором РСДБ-пункте, будет равна:

$$\Phi_2(t) = \psi(t) - \Delta, \quad (3)$$

где  $\Delta$  – дополнительный сдвиг фазы, обусловленный разностью расстояний от излучателя до первого и второго приёмника.

При дальнейшей обработке в корреляторе сигналы, принятые двумя приёмниками, перемножаются без сдвига по времени. Тогда

сигнал коррелятора в соответствии с (1) - (3) может быть представлен в виде:

$$E_1(t)E_2(t) = \frac{E_0^2}{4} \left[ e^{i\phi_1(t)+i\Delta} + e^{-i\phi_1(t)-i\Delta} \right], \quad (4)$$

Если дополнительный сдвиг фаз  $\Delta \leq \pi$ , то можно, как показывает опыт, пренебречь его флуктуациями из-за монохроматичности исходного шумового сигнала.

Наиболее важной статистической характеристикой выходного сигнала интерферометра является его частотный спектр мощности. Для теоретического расчёта последнего удобно сначала записать корреляционную функцию выходного сигнала:

$$\Gamma(\tau) = \langle [E_1(t)E_2(t) - \langle E_1(t)E_2(t) \rangle][E_1(t+\tau)E_2(t+\tau) - \langle E_1(t)E_2(t+\tau) \rangle] \rangle, \quad (5)$$

где косые скобки  $\langle \rangle$  обозначают статистическое усреднение.

Подставляя (4) в (5) и предполагая при усреднении, что фаза  $\phi_1$  распределена по нормальному закону [5], получим:

$$\Gamma(\tau) = \frac{E_0^4}{2} \left\{ e^{-\frac{1}{2}\langle [\phi_1(t) - \phi_1(t+\tau)]^2 \rangle} + e^{-\frac{1}{2}\langle [\phi_1(t) + \phi_1(t+\tau)]^2 \rangle} \cos(2\Delta) - 2e^{-\langle (\phi_1(t))^2 \rangle} \cos^2(\Delta) \right\} \quad (6)$$

Рассмотрим случай малой случайной разности фаз  $\langle (\phi_1(t))^2 \rangle \ll 1$ . Выберем фазовый сдвиг  $\Delta$  равным  $\Delta = \pi/2$ . Тогда выражение (6) упрощается:

$$\Gamma(\tau) \approx E_0^4 \langle \phi_1(t)\phi_1(t+\tau) \rangle. \quad (7)$$

В приближении геометрической оптики, выражения для фазы записываются в виде:

$$\varphi(\mathbf{r}, t) = -A \int_0^z P_1(x, y, \xi, t') d\xi \quad (8)$$

Предполагается, что флуктуации параметров волны при  $z=0$  отсутствуют. Интегралы в (8) берутся вдоль характеристики

$$t' = t - \frac{z - \xi}{u_0}, \quad (9)$$

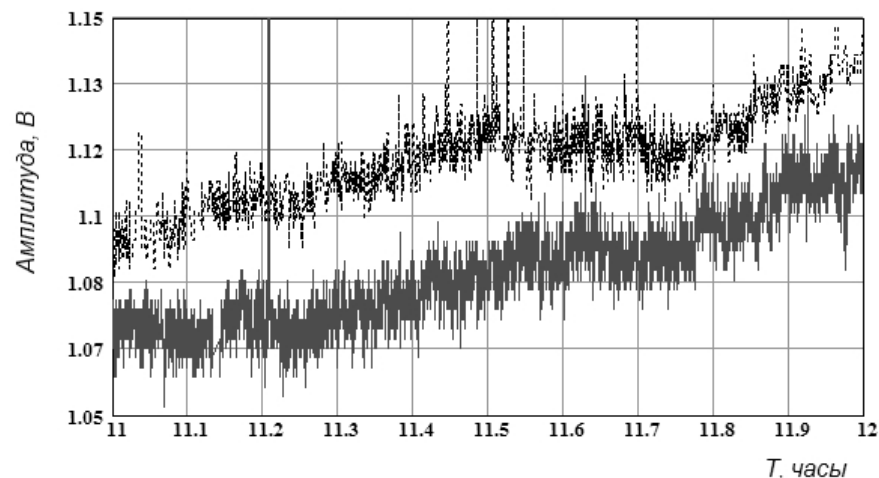


Рис. 3

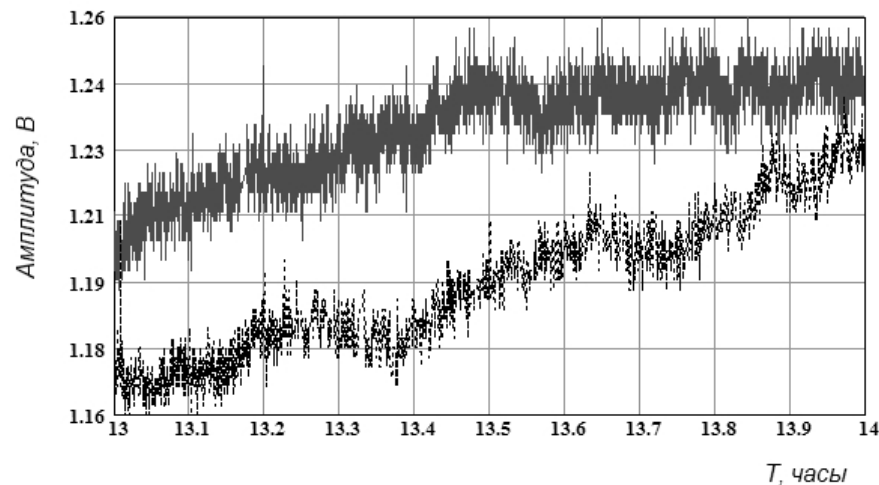


Рис. 4

#### 4. Экспериментальные исследования

В 2010 году проведены три длительных сеанса наблюдений одиночным радиотелескопом РТ-14 в Старой Пустыни яркостной температуры ионосферы в зоне нагрева стендом СУРА в искусственно возмущённом и спокойном состоянии (эксперимент NIRFI10.1). На рис. 2 показана зависимость изменения от времени выходного сигнала РТ-14 на частоте 327 МГц при наблюдении зоны нагрева: кривая (1) измерена 6 сентября 2010 года при длительных включениях стенда СУРА, график которых приведен на нижней шкале, кривая (2) – при эпизодических включениях стенда 7 сентября 2010 года и кривая (3) – без искусственного воздействия на ионосферу 2 октября 2010 года.

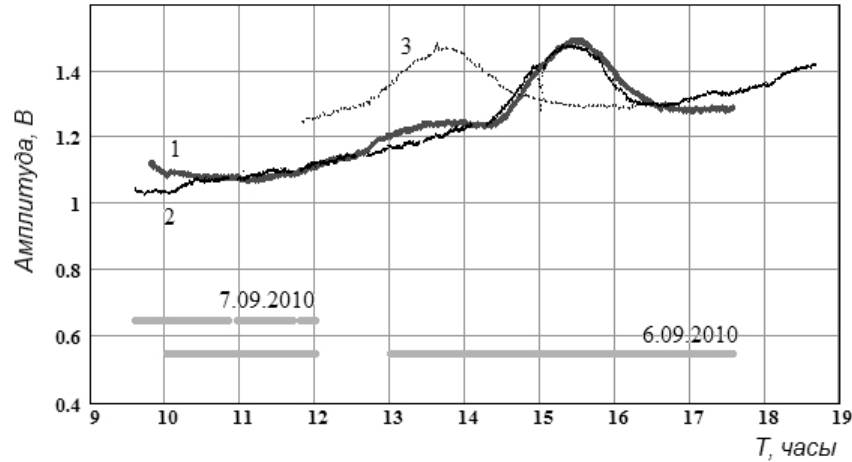


Рис. 2

где  $u_0$  – групповая скорость невозмущённой волны.  $x, y, z$  – декартова система координат, выбранная таким образом, что направление распространения излучения от источника до антенны 1 совпадает с осью  $z$ ;  $\mathbf{r} = \{x, y, z\}$  – радиус-вектор точки наблюдения;  $Z$  – толщина слоя неоднородностей;

$$P = N + P_1(\mathbf{r}, t) \quad (10)$$

– параметр, характеризующий свойства среды (электронная концентрация  $N_e$ ),  $N = const$  – невозмущённая компонента параметра среды,  $P_1$  – флуктуирующая компонента.

Соотношение (8) выведено в приближении плавности изменения параметров среды в пространстве и времени и малости их флуктуаций:

$$|P_1(\mathbf{r}, t)| \ll |P_0| \quad (11)$$

$$A = -\frac{\omega_p^2}{2N\omega_0 c}, \quad (12)$$

где  $\omega_p$  – электронная плазменная частота,  $c$  – скорость света в вакууме. Введем корреляционную функцию флуктуаций параметров среды:

$$B_P(\rho'_x, \rho'_y, \rho'_z, \tau') = \langle P_1(x_1, y_1, z_1, t_1) P_1(x_2, y_2, z_2, t_2) \rangle, \quad (13)$$

$$\rho'_x = x_2 - x_1, \rho'_y = y_2 - y_1, \rho'_z = z_2 - z_1, \tau' = t_2 - t_1.$$

Используем следующее спектральное представление для функции  $B_P$ :

$$B_P(\rho', \tau') = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \Phi_P(\mathbf{k}, \Omega) \cdot e^{i\Omega\tau' - i\mathbf{k}\rho'} d\mathbf{k} d\Omega \quad (14)$$

где  $\Phi_P$  – спектральная плотность мощности случайных изменений параметров среды (электронной концентрации).

Преобразуем выражение (7):

$$\begin{aligned} \langle \phi(\mathbf{r}, t) \phi(\mathbf{r}, t + \tau) \rangle &= A^2 \int_0^{z_2} \int_0^{z_1} \langle P_1(x_1, y_1, \xi_1, t_1) P_1(x_1, y_1, \xi_2, t_2) \rangle d\xi_1 d\xi_2 = \\ &= A^2 \int_0^Z \int_0^Z B_P(0, 0, \xi_2 - \xi_1, \tau') d\xi_1 d\xi_2 = A^2 Z \int_{-\infty}^{\infty} B_P\left(0, 0, \rho, \tau + \frac{\rho}{c}\right) d\rho = \\ &= A^2 Z \int_{-\infty}^{\infty} d\rho \int_{-\infty}^{\infty} \Phi_P(\mathbf{k}, \Omega) e^{i\Omega\tau + i\Omega\frac{\rho}{c} - i\mathbf{k}_z\rho} d^2\mathbf{k} d\Omega \end{aligned} \quad (15)$$

Таким образом, в этом случае корреляционная функция выходного сигнала интерферометра полностью определяется временной корреляцией фазового сдвига сигналов в двух точках приёма.

$$\Gamma(\tau) = 2\pi A^2 Z E_0^4 \int_{-\infty}^{\infty} \Phi_p\left(\kappa_x, \kappa_y, \frac{\Omega}{c}, \Omega\right) e^{i\Omega\tau} d\kappa_x d\kappa_y d\Omega \quad (16)$$

Интересующий нас частотный спектр мощности выходного сигнала интерферометра  $Y(\Omega)$  получается путем Фурье-преобразования выражения (16). Для получения вида спектра мощности сигнала интерферометра необходимо выбрать модель турбулентности  $\Phi_p(\mathbf{k}, \Omega_0)$  исследуемой области, наиболее точно описывающей пространственно-временное распределение исследуемого параметра среды.

В качестве примера пространственного спектра рассмотрим функцию Гаусса:

$$\Phi = \exp\left\{-\frac{\Omega^2}{\omega^2} - \frac{1}{4}(\kappa_x^2 + \kappa_y^2)l_0^2\right\} \quad (17)$$

где  $\omega \sim \frac{1}{\tau_0}$ ,  $\tau_0$  – некоторый временной масштаб процессов, протекающих в ИИТ,  $l_0$  – максимальный масштаб неоднородностей.

В этом случае выражение для спектра мощности сигнала интерферометра в случае слабых флуктуаций фазы примет вид гауссовой функции:

$$Y(\Omega) \sim e^{-\frac{\Omega^2}{\omega^2}} \quad (18)$$

Ширина спектра равна  $2\omega$ , измерения которой по экспериментальным откликам позволят сделать оценки временных масштабов изменения неоднородностей в ионосферной плазме.

Получение более полной информации о ИИТ требует подробного описания пространственного спектра распределения электронной концентрации в ИИТ, для чего будет проведён анализ доступной информации о возможном состоянии ионосферы в условиях повышенной турбулентности.

- основной режим РСДБ с записью квантованного сигнала,
- наблюдение собственного излучения возмущённой области ионосферы одиночными радиотелескопами с записью интенсивности сигнала.

Наблюдение собственного излучения возмущённой области ионосферы – наиболее простой способ измерений, т.к. антенна направляется в точку центра возмущённой области и остаётся неподвижной в течение всего сеанса наблюдений. Первый подобный эксперимент ФГНУ НИРФИ на комплексе РТ-15 – стенд СУРА описан в работе [12].

Таблица 3

Имя источника		Прямое восхождение и склонение на эпоху 2000.0			S <sub>v</sub> (Ян) 327 МГц	S <sub>v</sub> (Ян) 1660 МГц
0137+331	3C48	01 37 41.299	+33 09 35.13	38	14	
0316+162	СТА21	03 18 57.800	+16 28 32.71	7	8	
0316+413	3C84	03 19 48.160	+41 30 42.10	54 ~	16 ~	
0429+415	3C119	04 32 36.503	+41 38 28.43	14	8	
0430+052	3C120	04 33 11.095	+05 21 15.62	6	5	
0518+165	3C138	05 21 9.886	+16 38 22.05	20	8.5	
0538+498	3C147	05 42 36.128	+49 51 7.18	57	22	
0624-058	3C161	06 27 10.078	-05 53 5.28	55	17	
0809+484	3C196	08 13 35.912	+48 13 2.15	56	13	
0831+557	\$	08 34 54.903	+55 34 21.13	9	8	
1216+081	3C270	12 19 23.220	+05 49 30.77	45	18	
1226+023	3C273В	12 29 6.700	+02 03 8.60	65	35-40	
1228+126	3C274	12 30 49.336	+12 23 28.89	800	195	
1253-055	3C279	12 56 11.167	-05 47 21.54	17	11	
1256+473	3C280	12 56 57.230	+47 20 19.82	16	4.5	
1328+307	3C286	13 31 8.284	+30 30 32.94	25	13	
1330+250	3C287	13 30 37.689	+25 09 10.98	15	6	
1409+524	3C295	14 11 20.762	+52 12 9.00	70	20	
1419+064	3C298	14 19 8.180	+06 28 34.80	35	5.5	
1458+718	3C309.1	14 59 7.584	+71 40 19.87	21	8	
1641+399	3C345	16 42 58.810	+39 48 37.00	11	7	
1828+487	3C380	18 29 31.725	+48 44 46.95	50	14	
1845+797	3C390.3	18 42 9.009	+79 46 17.13	45	11	
2200+420	BL_LAC	22 02 43.291	+42 16 39.98	2-3	5	
2223-052	3C446	22 25 47.259	-04 57 1.39	15	6	
2230+114	СТА102	22 32 36.409	+11 43 50.90	7 ~	7 ~	
2251+158	3C454.3	22 53 57.748	+16 08 53.57	13 ~	11 ~	



Таблица 2

Пункт	Старая Пустынь	Зимёнки	Ирбене	Евпатория	Калязин
Азимут (от севера) на стенд СУРА	$70^\circ \pm 8.8^\circ$	$90^\circ \pm 12.7^\circ$	$86^\circ \pm 1^\circ$	$31^\circ \pm 0.9^\circ$	$100^\circ \pm 2.8^\circ$
Угол места в направлении на область ИИТ	$57^\circ \pm 1^\circ$ Макс. $77^\circ$	$66^\circ \pm 1^\circ$ $81^\circ$	$9.6^\circ \pm 0.4^\circ$ $25^\circ$	$10^\circ \pm 0.4^\circ$ $25^\circ$	$26^\circ \pm 0.6^\circ$ $54^\circ$
$\Delta\theta_{0.5}$ градусы (327 МГц)	4.6	4.3	2.1	0.92	1.0
Расстояние до стенда СУРА (км)	162	111	1478	1516	515

### 3. Планирование экспериментов на комплексе «Сеть РСДБ – стенд СУРА»

Особое внимание при планировании экспериментов уделяется выбору радиоисточников для просвечивания искусственной ионосферной турбулентности. При этом необходимо учитывать следующие основные моменты: наблюдаемые радиоисточники должны иметь «точечную» или симметричную структуру, достаточно большую плотность потока для уверенного приёма сигнала, попадать в зону взаимной видимости комплекса радиотелескопов, и кроме того, должны наблюдаться только днём, когда нагрев ионосферы наиболее эффективен.

Из анализа каталогов радиоисточников (в том числе, [10,11]) были отобраны двадцать семь объектов, подходящих для проведения данных исследований, которые приведены в таблице 3 (символом ~ обозначен переменный поток). На первом этапе выбирались наиболее мощные из них. Поскольку измерения планируется проводить с мая по ноябрь, в зоне наблюдения будут находиться разные группы источников. Оценки показывают, что в определённый период наблюдений можно использовать очень ограниченное число радиоисточников.

В процессе подготовки РСДБ ФГНУ НИРФИ к работе по программе с нагревом ионосферы определились две возможных процедуры наблюдений в зависимости от готовности различных пунктов сети:

### 2. Структура комплекса «Сеть РСДБ – стенд СУРА»

Основой приёмного комплекса является двухэлементный РСДБ ФГНУ НИРФИ с пунктами «Старая Пустынь» (РТ-14) и «Зимёнки» (РТ-15) [6, 7]. В расширенную сеть входит пункт РСДБ «Ирбене» (РТ-32) в Вентспилсе, регулярно принимающий участие в совместных с ФГНУ НИРФИ исследованиях, а также радиотелескопы в Евпатории (РТ-70) и Калязине (РТ-64), которые предполагается задействовать в работе по данной тематике.

Радиотелескопы ФГНУ НИРФИ РТ-14 и РТ-15 оборудованы облучающими и приёмными системами для одновременной работы на частотах 327, 610 и 1660 МГц. Длина базы равна 69 км; пространственное разрешение интерферометра в диапазоне 327 МГц – около 2.8 угловой секунды. Инструмент оснащён системами регистрации MARK-II (с записью на магнитные ленты в полосе 2 МГц) и ТН-16 (собственной разработки с записью информации на жёсткий диск компьютера); стандартами частоты и времени с синхронизацией местных шкал времени по сигналам GPS: водородными VCH-1005 и VCH-1006 и рубидиевым VCH-311. Регистрация осуществляется в частотных полосах 2, 4, 8 МГц.

Пункт «Ирбене» оснащён приёмником на 327 МГц и терминалом записи ТН-16 (оба изготовлены ФГНУ НИРФИ). В Евпатории – собственные приёмные системы на две частоты, работающие одновременно, и терминал записи NRTV итальянской разработки. В качестве преобразователей используются видеоконвертеры MARK-II с полосой приёма 2 МГц.

В таблице 1 приведены основные параметры и координаты пунктов (D – диаметр антенны радиотелескопа, X, Y, Z – координаты в геоцентрической декартовой системе координат).

Нагревный стенд для микроволновой диагностики ионосферы СУРА (ФГНУ НИРФИ) предназначен для мониторинга верхней атмосферы Земли на основе контролируемых воздействий на нее мощным коротковолновым радиоизлучением [8, 9]. Основу радиокomплекса составляют три коротковолновых радиопередатчика ПКВ-250 с диапазоном частот 4 – 25 МГц и мощностью 250 кВт каждый и трёхсекционная приёмно-передающая антенна ППАДД размером 300×300 м с полосой частот 4.3 – 9.5 МГц, коэффициент усиления антенны  $G=200\div380$ . Имеется возможность наклона диаграммы направленности антенны от вертикали на  $12^\circ$  в плоскости

Таблица 1

Пункт	D, м	Частота, МГц	Долгота	Широта	X, м	Y, м	Z, м
Старая Пустынь, Нижегород. обл.	14	327 610 1665	43°37'51.3"	55°39'18.7"	2610582.7	2488631.6	5243018.7
Зимёнки, Нижегород. обл.	15	327 610 1665	44°17'07.0"	56°09'15"	2549035.4	2486162.3	5274220.3
Ирбене, Латвия	32	327	21°51'17.2"	57°33'12.1"	3183675.0	1276930.0	5359219.0
Евпатория, Украина	70	327 1665	33°11'12.8"	45°11'21.1"	3768315.2	2464732.6	4502224.6
Калязин, Тверская обл.	64	610 1665	37°54'01.2"	57°13'22.9"	2731190.4	2126198.3	5339535.6

геомагнитного меридиана (на юг), при этом достигаются наилучшие условия для возникновения мелкомасштабных неоднородностей. Однако в этом случае становятся неопределёнными границы возмущённой области, а для наклона луча требуется время порядка нескольких часов, требуемое для необходимого фазирования передающей антенной решётки. Поэтому на начальном этапе исследований все эксперименты планируются для вертикального зондирования ионосферы.

Основное условие при проведении экспериментов по рассматриваемой тематике – наблюдения могут проводиться только днём в условиях освещения ионосферы Солнцем, поскольку ночью из-за низких критических частот в ионосфере не происходит возбуждение неоднородностей. Данное обстоятельство требует контроля солнечной активности, поскольку при мощных вспышках на Солнце возникает сильная помеха, мешающая корреляционной обработке данных, а также возможно дополнительное возмущение ионосферы, влияние которого нельзя отделить от влияния искусственного нагрева.

На рис. 1 показана схема эксперимента по исследованию ионосферы методом радиопросвечивания. Пунктирными кружками отмечены пункты РСДБ, которые планируется задействовать в будущих экспериментах. Заштрихованная область над излучателями

нагревного стенда – это область максимальной турбулентности при искусственном воздействии на неё. Согласно геометрии существующего приёмного РСДБ-комплекса и взаимного расположения трёх пунктов РСДБ и нагревного стенда «Сура» наблюдаемые радиоисточники должны находиться в зоне направлений «восток – северо-восток» относительно опорного РСДБ-пункта для того, чтобы радиоизлучение источника проходило через основную возмущённую область. В таблице 2 приведены азимуты и углы места направления антенн сети при наблюдении центра возмущённой области с указанием её границ и полуширина диаграммы направленности  $\Delta\theta_{0,5}$  на самой низкой рабочей частоте сети.

Видно, что при нахождении источника в направлении возмущённой зоны для одного из пунктов, для остальных в большинстве случаев он будет вне этой зоны. Т.е. флуктуации сигнала будут фиксироваться только одной антенной, остальные можно считать «опорными».

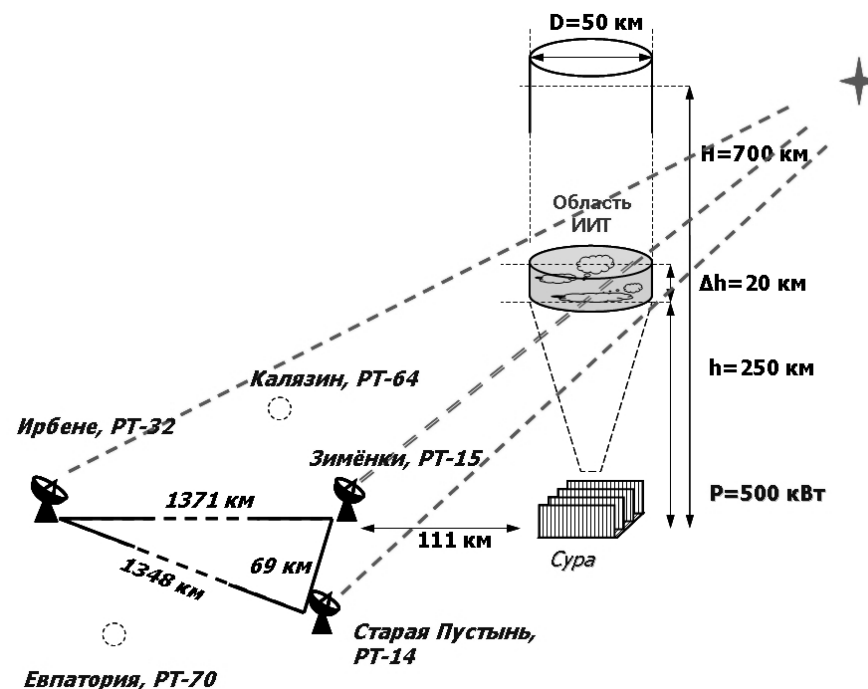


Рис. 1