

**Федеральное агентство по науке и инновациям**

**Федеральное государственное научное учреждение  
"Научно-исследовательский радиофизический институт"  
(ФГНУ НИРФИ)**

**Препринт № 523**

**РАДИОИНТЕРФЕРОМЕТР С НЕЗАВИСИМЫМ  
ПРИЁМОМ ДЛЯ СОЛНЕЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
Приёмный комплекс**

**Абрамов В.И.  
Антипенко А.А.  
Дементьев А.Ф.  
Дугин Н.А.  
Нечаева М.Б.  
Снегирев С.Д.  
Тихомиров Ю.В.  
Формозов Б.С.**

**Нижний Новгород 2008**

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 – 28 с.

Приводится описание радиointерферометра ФГНУ НИРФИ с независимым приёмом, созданного на базе антенн РТ-14 в РАО "Старая Пустынь" и РТ-15 в РАО "Зимёнки" и предназначенного для исследований радиоизлучения Солнца в сантиметровом и дециметровом диапазонах длин волн.

Рассмотрены системы облучения антенн, приёмная и регистрирующая аппаратура. Проведены эксперименты на радиointерферометрах с малыми базами в РАО "Старая Пустынь" и на РСДБ "Старая Пустынь – Зимёнки" с целью измерения параметров комплекса. Приводятся результаты обработки экспериментальных данных, выполненной на корреляторе "НИРФИ-3" непосредственно во время сеансов измерений.

Авторы благодарят профессора В.А. Разина, Т.С. Подстригача и сотрудников радиоастрономических обсерваторий "Старая Пустынь" и "Зимёнки" за помощь в осуществлении радиointерферометрических экспериментов.

Работа поддержана грантом РФФИ № 06-02-16981 и ГАО РАН (Пулково).

## Введение

Одним из научных направлений, развиваемых в ФГНУ НИРФИ, является изучение вспышечных процессов, проявляющихся в солнечном радиоизлучении. Такие исследования направлены на получение все более детальных характеристик этих процессов. Особое внимание уделяется изучению их тонкой спектральной, временной и пространственной структур.

Эксперименты по исследованию фрагментированного солнечного излучения радиоинтерферометрическим методом были начаты в ФГНУ НИРФИ в середине 90-х годов. В этот же период началось создание радиоинтерферометрического комплекса ФГНУ НИРФИ, предназначенного для проведения исследований быстровременных (с длительностью менее секунды) процессов на Солнце, слабых вспышечных явлений ("микровспышек"), процессов рассеяния микроволнового излучения в короне Солнца. Радиоинтерферометрический комплекс был создан на основе радиотелескопов РТ-7, РТ-14 и РТ-15 в "Старой Пустыни" и "Зимёнках". Комплекс позволяет изучать локализацию, пространственные размеры и динамику источников солнечных радиовсплесков с высоким (до 64 мкс) временным разрешением, а также оценивать их яркостную температуру. С помощью малобазового интерферометра в "Старой Пустыни" в 1994 году исследована пространственная динамика источников солнечных субсекундных всплесков в дециметровом диапазоне длин волн [1]. Наблюдения компактных солнечных вспышек непосредственно на радиоинтерферометре независимого приёма "Зимёнки – Старая Пустынь" начаты в 2006 году [2].

В связи с развитием РСДБ технологий потребовалась модернизация и совершенствование приёмной и регистрирующей аппаратуры для повышения эффективности работы созданного инструмента. С этой целью были выполнены следующие работы:

- модернизация и настройка трехчастотных облучателей приёмных антенн РТ-14 и РТ-15, измерение параметров антенн с новыми облучателями;

- совершенствование и апробация приёмного аппаратного комплекса;

- модернизация системы регистрации сигналов на жесткие диски компьютера;

- отладка методик обработки РСДБ-данных при исследовании спорадического излучения Солнца.

Проведены натурные испытания приёмной и регистрирующей аппаратуры для одновременных двухчастотных наблюдений Солнца (327 и 610 МГц) на радиоинтерферометрах ФГНУ НИРФИ с базами от 70 м до 70 км. В качестве калибровочных источников использовались наиболее интенсивные дискретные источники Кассиопея А, Лебедь А, Дева А и радиоисточники 3С 273, 3С 123, 3С 147, 3С 196, 3С 295, 3С 161, 3С 48. При малых базах интерферометров (70 и 130 м на разных частотах) практически все источники можно было считать точечными, что позволило найти корреляцию сигналов двух антенн по самым мощным источникам, включая Солнце. Во время сеансов наблюдений неоднократно регистрировались импульсные сигналы, по которым обрабатывалась процедура исследования спайкоподобных явлений.

## **1. Трехчастотные облучатели антенн РТ–14 и РТ–15**

Для эффективных исследований солнечных "спайков" требовалось проведение одновременных наблюдений в нескольких диапазонах длин волн (в основном, дециметровом). Исследования предполагалось осуществлять на базе радиотелескопов "Зимёнки" РТ–15 и "Старая Пустынь" РТ–14. Исходя из характеристик антенн и их систем наведения, были выбраны три рабочих частоты – 327, 610 и 1670 МГц, входящие в список выделенных радиоастрономических частот.

Для обеспечения одновременности наблюдений в выбранных диапазонах потребовалась разработка совмещенного облучателя небольших размеров и технологически простого (для изготовления в мастерских ФГНУ НИРФИ), что являлось сложной задачей, т.к. на практике известные совмещенные конструкции требовали соотношения частот не менее 1:3 [3–8].

### **1.1. Исходная конструкция многочастотного облучателя**

Трехчастотный облучатель (рис.1) был разработан И.Ф. Беловым и изготовлен в 2003 году для облучения на круговой поляризации параболических антенн РТ–15 и РТ–14, используемых в интерферометрах ФГНУ НИРФИ. Основой облучателя является коаксиальная структура, в которой для каждой частоты используется свой коаксиальный волновод [3, 4]. Излучателем облучателя на высшей частоте, 1670 МГц, служит открытый конец круглого волновода (с волнами  $TE_{11}$  для каждой линейной поляризации), работающий в одномодовом режиме, а на частотах 610 и 327 МГц – открытые концы коакси-

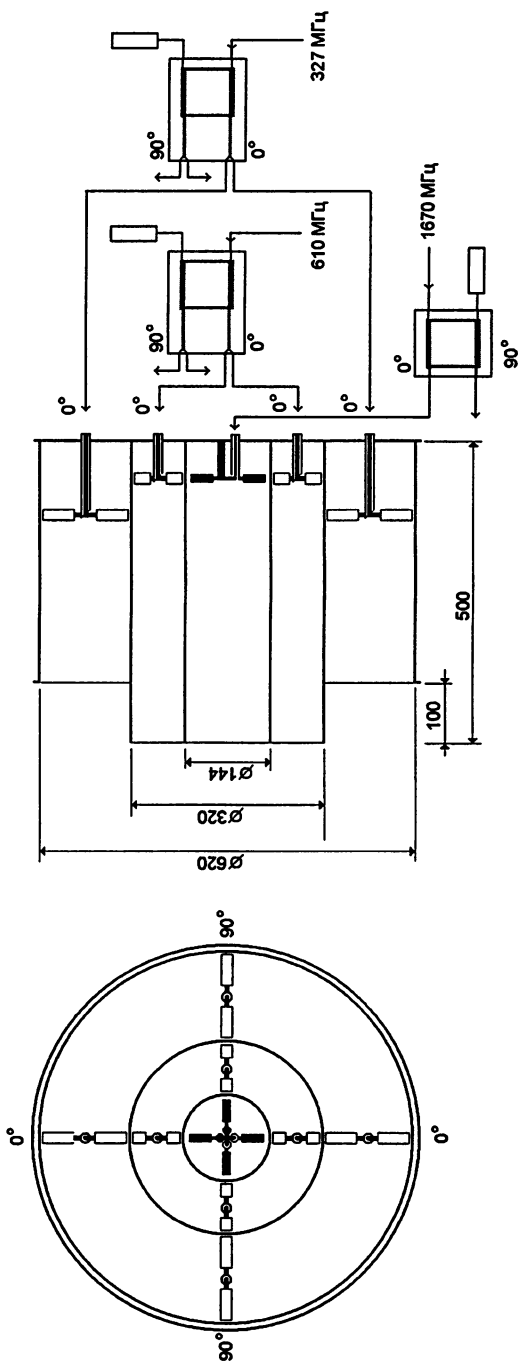


Рис. 1. Схема изготовленного (исходного) трехчастотного облучателя с КВП и системой питания

альных волноводов (с волнами  $TE_{11}$ ), работающие в двухмодовом ( $TEM$  и  $TE_{11}$ ) режиме. Преобразование линейных поляризаций в круговую поляризацию осуществлялось с помощью квадратурных мостов полосковой конструкции (рис 1).

Возбуждение ортогональных волн  $TE_{11}$  в круглом волноводе выполнено с помощью двух взаимно перпендикулярных симметричных "полуволновых" вибраторов, расположенных на оси круглого волновода на расстоянии около четверти длины волны от его задней стенки.

Для упрощения конструкции системы питания коаксиальных облучателей (610 и 327 МГц) в первом варианте была выбрана (и опробована) схема возбуждения волны  $TE_{11}$  коаксиального волновода с помощью двух синфазных диполей, подключенных параллельно через четвертьволновый трансформатор к одному из выходов квадратурного моста. Вибраторы для каждой линейной поляризации располагались аксиально в плоскости, параллельной задней стенке, а их полярности выбирались из условия возбуждения волны  $TE_{11}$  и подавления волны  $TEM$ . Достоинством такой схемы является возможность введения широкополосного  $180^\circ$  фазового сдвига между диполями за счет поворота одного из диполей на  $180^\circ$  и тем самым исключения полуволновой петли из системы питания.

Однако эксперимент (подтвержденный теоретическим анализом) показал, что для заданного разнеса частот эта схема неэффективна: согласование изготовленных коаксиальных облучателей оказалось неудовлетворительным, крайне нестабильным, а сама процедура настройки очень кропотливой. Кроме того, подавление волны  $TEM$  также невысокое и нестабильное.

Измерения параметров антенн с облучателями данной конструкции проводились наиболее полно на частоте 610 МГц в тестовых экспериментах 2006–2007 гг. Несмотря на большие потери рассогласования облучателя, излучение Солнца принималось уверенно – на рис.2 показана запись вспышки 5 ноября 2006 года, зафиксированная в двух пунктах. Однако невозможность регистрации сигналов слабых источников для калибровки базы и неудовлетворительные поляризационные характеристики потребовали доработки облучающих систем.

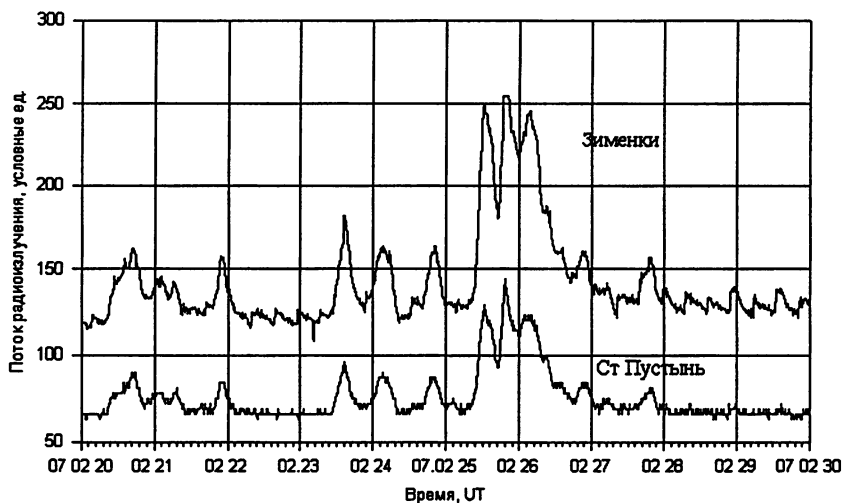


Рис. 2. Запись интенсивности принятого сигнала от Солнца в РСДБ пункте "Старая Пустынь" (нижняя кривая) и "Зимёнки" (верхняя кривая) на одном временном интервале 5 ноября 2006 г.

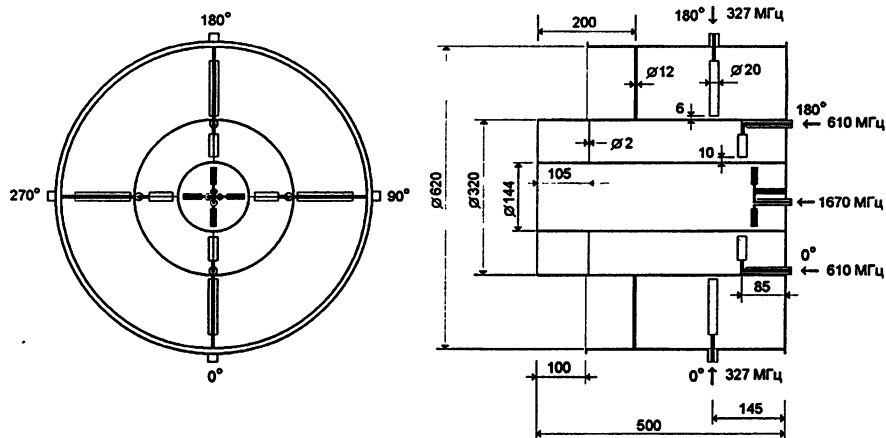


Рис. 3. Схема модернизированного трехчастотного облучателя с КВП (система питания не показана)

## 1.2. Модернизация согласующей системы коаксиального облучателя

Модернизация согласующей системы изготовленного облучателя на частотах 610 и 327 МГц проводилась для обеспечения удовлетворительного согласования в полосе около 30 МГц без изменения размеров его коаксиальной структуры (рис. 3).

Выполненный анализ показал, что особенностью коаксиального типа облучателя является очень плохое апертурное согласование, т.е. согласование излучаемой волны  $TE_{11}$  со свободным пространством [5]. Апертурное согласование резко ухудшается с уменьшением отношения  $D/d$  диаметров труб коаксиального волновода [7, 9] (которое определяется разном рабочим частотам многочастотного облучателя), и в нашем случае при  $D/d \approx 2$ , коэффициент отражения достигает величины 0,6 (т.е.  $S_{11} = -4,5$  дБ, рис. 4). Это является причиной трудности согласования облучателя с помощью лишь одних диполей (рассогласованных), т.к. последние должны не только обеспечивать точную величину и необходимую фазочастотную зависимость большого коэффициента отражения, но и находиться на определенном расстоянии от апертуры, образуя вместе с ней согласующий резонатор. Поэтому обычно согласование осуществляют раздельно для апертуры и для возбуждения волны  $TE_{11}$ , а отношение частот (и соответственно  $D/d$ ) выбирают не менее 3:1. В этом случае  $S_{11} < -12$  дБ, и удается обеспечить довольно широкополосное (15–30%) согласование апертуры, которое проводится с помощью двух-трех осесимметричных диафрагм, расположенных примерно на расстоянии четверти длины волны друг от друга и от апертуры [6–8].

В нашем случае такой метод непригоден из-за недостаточной длины изготовленного облучателя. Поэтому, с учетом невысоких требований к широкополосности (5–10%), была исследована возможность согласования апертуры с помощью лишь одного элемента, вносящего поляризационно-изотропное отражение с подходящими амплитудными и фазочастотными характеристиками.

В результате был предложен и реализован простой метод узкополосного согласования коаксиальной апертуры. Согласование достигается с помощью четырех короткозамкнутых индуктивных штырей, расположенных в одной плоскости через 90 градусов, позади плоскости апертуры (на расстоянии  $\approx 0,2 \lambda_0$  от края внутренней трубы).



Благодаря симметрии конструкция не вносит анизотропию отражения, а высшие типы волн, возбуждаемые штырями, из-за достаточного затухания практически не влияют на диаграмму направленности (ДН). Достоинством этого метода, помимо простоты реализации, является также возможность использования согласующего устройства одновременно в качестве «металлического изолятора», обеспечивающего центрирование труб коаксиальной структуры.

Для возбуждения волны  $TE_{11}$  в новой конструкции был применен обычный согласованный коаксиально-волноводный переход (КВП) в виде двух монополей, запитываемых в противофазе.

Положение и диаметр согласующих штырей, обеспечивающих максимально возможную широкополосность согласования апертуры, определялись в процессе компьютерного трехмерного электромагнитного моделирования S-параметров коаксиального облучателя.

### 1.3. Характеристики коаксиального облучателя

Результаты компьютерного моделирования коэффициентов отражения волны  $TE_{11}$  в апертуре для обоих частотных диапазонов приведены на рис. 4 и рис. 5. На них изображены рассчитанные частотные зависимости коэффициента отражения апертуры при отсутствии и наличии согласующих штырей с размерами, приведенными на рис. 3. Из графиков видно, что индуктивные стержни являются эффективным средством согласования сильно рассогласованной апертуры, снижая коэффициент отражения с  $-(4,5 \div 6)$  до  $< -14$  дБ в 10%-й полосе частот (и до  $< -20$  дБ в 4,5%-й полосе).

На тех же рисунках приведены коэффициенты отражения КВП в виде двух синфазных монополей (рис.3), которые значительно ниже, чем апертурные коэффициенты отражения. Поэтому результирующая частотная зависимость КСВ определяется, в основном, согласованной апертурой. Это подтверждается рис. 6 и 7, на которых представлены частотные зависимости измеренных КСВ облучателя на линейной поляризации, включающего помимо собственно облучателя (излучающая апертура + два КВП) еще «полуволновую» петлю и синфазный делитель мощности.

Результаты компьютерного трехмерного моделирования электромагнитного поля излучения представлены на рис. 8 и 9, на которых показаны ДН на основных (в E- и H- плоскостях) и кроссполяризованных (в плоскости  $45^\circ$ ) компонентах для обоих частотных диапазонов.

На частоте 610 МГц ДН обладает хорошей круговой симметрией и невысоким уровнем кроссполяризации и боковых лепестков.

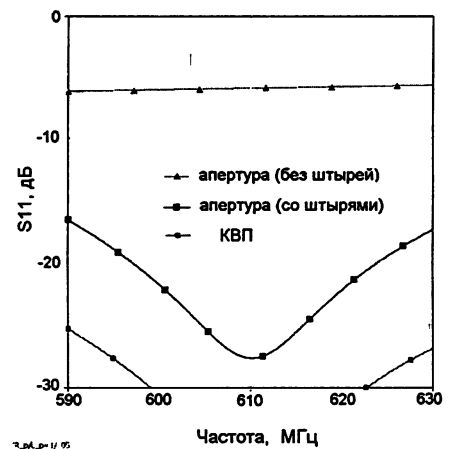
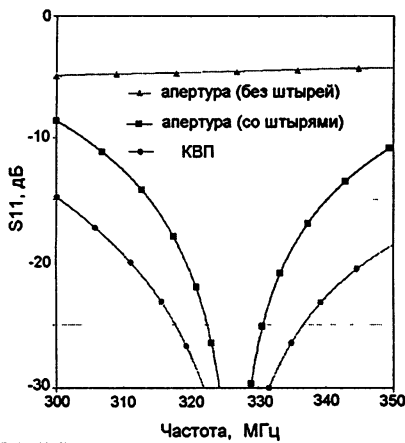


Рис. 4. Расчетные коэффициенты отражения облучателя на 327 МГц. Диаметр согласующих штырей 12 мм

Рис. 5. Расчетные коэффициенты отражения облучателя на 610 МГц. Диаметр согласующих штырей 2 мм

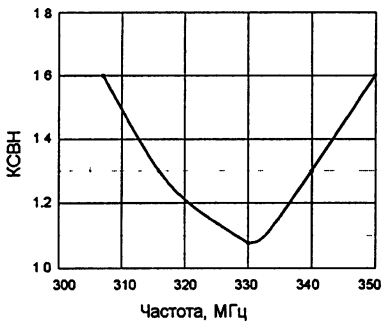


Рис. 6. Измеренный КСВ облучателя на 327 МГц (апертура со штырями + два КВП + полуволновая петля + делитель мощности)

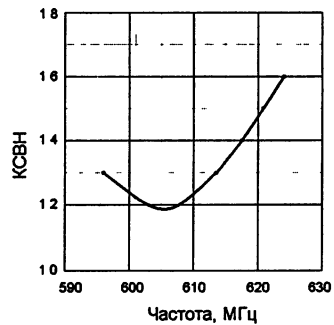


Рис. 7. Измеренный КСВ облучателя на 610 МГц (апертура со штырями + два КВП + полуволновая петля + делитель мощности)

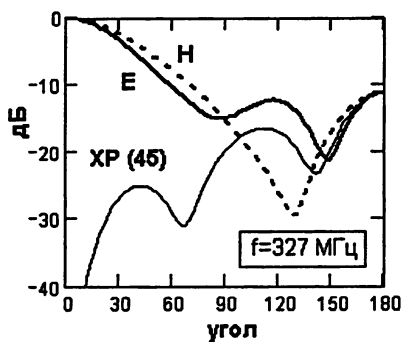


Рис.8. Расчетные ДН на основных и кроссполаризованных компонентах на частоте 327 МГц

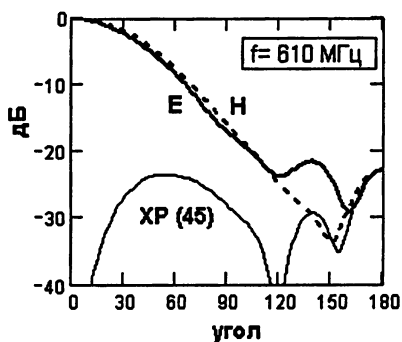


Рис.9. Расчетные ДН на основных и кроссполаризованных компонентах на частоте 610 МГц (с учетом влияния геометрии облучателя 327 МГц)

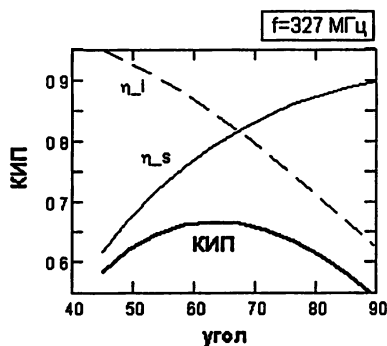


Рис.10. Расчетные величины КИП и его составляющих на частоте 327 МГц (без учета влияния затенения)

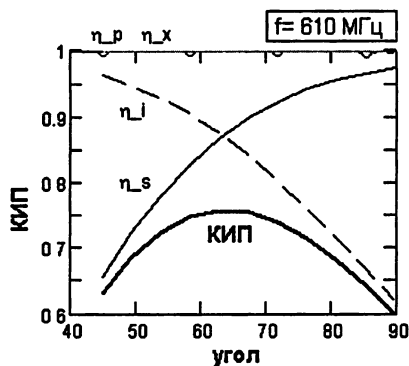


Рис.11. Расчетные величины КИП и его составляющих на частоте 610 МГц (без учета влияния затенения)

На частоте 327 МГц асимметрия и уровень боковых оказались выше. Поэтому желательна оптимизация апертурных размеров облучателя, а также системы его питания, которые позволят использовать облучатель не только для обычных РСДБ измерений, но и для поляризационных.

На рис. 10 и 11 приведены рассчитанные по ДН коэффициенты использования поверхности (КИП) как функции углового полуаскрыва параболоида вращения. КИП и его составляющие вычислялись по известным формулам [10], без учета омических потерь и влияния затенения. Здесь  $\eta_i$  и  $\eta_s$  – парциальные коэффициенты, учитывающие неравномерность распределения поля по апертуре и "перелив" мощности за края зеркала. Парциальные коэффициенты  $\eta_p$  и  $\eta_x$ , учитывающие кроссполяризацию и фазовые погрешности, оказались близкими к 1. Для оптимального полуаскрыва ( $\approx 64^\circ$ ) ожидаемый КИП составляет 0,67 (327 МГц) и 0,76 (610 МГц). Для радиотелескопов РТ-14 и РТ-15 (угол полуаскрыва  $\approx 74^\circ$ ) величины КИП оказались соответственно 0,65 и 0,73.

Ширина диаграмм направленности антенн, измеренных по Солнцу, близка к расчетной на обеих частотах.

Проведенная модернизация облучателей существенно снизила потери отражения и заметно (в 3–4 раза) повысила эффективную площадь радиотелескопов, что наряду с повышением чувствительности приёмной системы позволило проводить регистрацию сигналов слабых источников для калибровки базы.

## 2. Приёмная аппаратура

Общая блок-схема приёмных комплексов на пунктах РСДБ ФГНУ НИРФИ представлена на рис. 12 (на развороте). Повышение эффективности РСДБ исследований тесно связано, в первую очередь, с увеличением чувствительности приёмной аппаратуры. Оно было достигнуто путем снижения шумовой температуры приёмников (за счет применения современных неохлаждаемых МШУ с  $T_{ш} < 80\text{К}$ ) и расширения полосы приёма и регистрации.

### 2.1. ВЧ блоки

С целью увеличения чувствительности приёмная система в РСДБ пункте "Старая Пустынь" была оснащена новым двухчастотным приёмником 327/610 МГц, разработанным под руководством В.П. Сырейщикова.

ВЧ блоки РСДБ приёмников осуществляют согласование с антенной, селективное усиление, переход на промежуточную частоту,

усиление ПЧ. В состав одного комплекта входят: 1) входной фильтр с полосой 40 МГц, 2) МШУ, 3) гетеродин, 4) смеситель, 5) ПУПЧ (частота ПЧ=170 МГц). ВЧ блок одного пункта выполнен совмещенным (330 и 610 МГц), с общим источником питания и температурой термостабилизации  $35^{\circ}\pm 0^{\circ},3$ .

### Основные технические характеристики

1. Центральные рабочие частоты 330 и 610 МГц.
2. Центральные частоты гетеродинов 440 и 500 МГц, мощность 15 мВт.
3. Полоса пропускания (по уровню 3 дБ) 40 МГц.
4. Температура шума МШУ 60–70 К (коэффициент шума около 0,8 дБ), шумовая температура приёмника для второго пункта около 200 К.
5. Коэффициент усиления по СВЧ тракту 50 дБ.
6. Коэффициент внеполосного затухания не хуже 30 дБ.
7. Неравномерность коэффициента передачи в полосе пропускания менее 3 дБ.
8. Крутизна подавления при расстройке от полосы пропускания (на 25 МГц) 30 дБ.
9. Динамический диапазон 45 дБ.
10. Входной импеданс тракта 50 Ом (разъем СРГ–50–751 ФВ).
11. Номинальное значение выходного сигнала  $\pm 1$  В.
12. Напряжение питания +12 В.

### 2.2. Четырехканальный видеоконвертер

Для расширения полосы приёма был разработан (под руководством Б.Н. Липатова) и изготовлен видеоконвертер с полосой приёма 60 МГц (150–210 МГц). Видеоконвертер предназначен для преобразования информативного сигнала с промежуточной частоты на стандартные верхние и нижние боковые полосы видеочастоты для дальнейшей их регистрации и обработки в приёмной системе интерферометра.

Видеоконвертер имеет четыре канала с набором выходных полос сигнала на регистрацию 2, 4, 8 и 16 МГц. Структурная схема видеоконвертера представлена на рис. 13. Одним из основных элементов видеоконвертера является блок 4-канального синтезатора частот гетеродинов.

Входной сигнал промежуточной частоты  $f_{np}=170$  МГц с полосой 150–210 МГц поступает на входной усилитель с коэффициентом усиления 20–25 дБ, затем идет на входной аттенюатор 0–31 дБ с



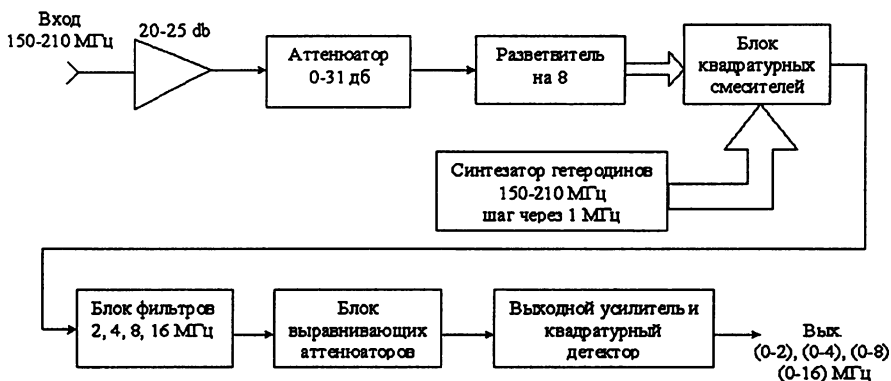


Рис. 13. Структурная схема видеоконвертера

дискретом 1 дБ, далее сигнал разветвляется на 8 параллельных каналов, которые поступают на входы квадратурного смесителя. На вторые входы квадратурного смесителя поступают сигналы 8-и гетеродинов с синтезатора частот гетеродинов. На выходах квадратурного смесителя получаем сигналы 4-х каналов верхней или нижней боковой полосы.

Далее сигналы поступают на блок фильтров, на выходах которого получаем сигналы в одной из частотных полос: 0–2, 0–4, 0–8, 0–16 МГц. С выходов блока фильтров сигналы поступают на блок аттенюаторов для выравнивания усиления по каналам. На выходе установлен блок выходных усилителей и квадратичный детектор, затем сигналы поступают на регистрирующее устройство. Блок гетеродинов для конвертера состоит из четырех независимых синтезаторов с частотой выходного сигнала от 150 до 210 МГц с шагом в 1 МГц.

#### Технические данные 4-канального синтезатора гетеродинных частот

1. Частота выходного сигнала - в пределах 150–210 МГц с шагом 1 МГц. Набор значений частоты осуществляется поканально с помощью пульта управления синтезатора.
2. Частота внешнего опорного сигнала 5 МГц.
3. Выходное напряжение сигнала на внешней активной нагрузке 50 Ом в диапазоне 150–210 МГц  $(0,5 \pm 0,1)$  В.
4. Напряжение входного опорного сигнала  $(0,5 \pm 0,1)$  В.
5. Ослабление паразитных спектральных составляющих с частотами, не кратными частоте выходного сигнала, не менее (55–60) дБ.

6. Ослабление паразитных спектральных составляющих с частотами, кратными частоте выходного сигнала, не менее 40 дБ.
7. Ослабление сетевых составляющих не ниже 50 дБ.
8. Количество каналов – 4.
9. Питание прибора осуществляется от сети переменного тока напряжением  $(220 \pm 20)$  В, частотой  $(50 \pm 0,5)$  Гц.

По результатам работ 2008 года предполагается перекомпоновка конвертеров для работы каждого на двух частотах с дополнительной полосой 0–1 МГц из-за присутствия помех в обоих диапазонах, особенно в пункте в "Зимёнках", расположенном поблизости от промышленных центров Кстово и Нижний Новгород.

### **2.3. Система синхронизации времени и система регистрации**

Радиоинтерферометр ФГНУ НИРФИ оснащен водородным стандартом VCH–1005 и рубидиевым VCH–311 стандартом частоты и времени с синхронизацией местных шкал времени по сигналам КНС ГЛОНАСС и GPS.

Синхронизация времени в приёмных пунктах РСДБ интерферометра производится по схеме, приводимой на рис.14. Сигналы точного времени принимаются приёмниками GPS/ГЛОНАСС и подаются на стандарты частоты и времени. В "Зимёнках" используется водородный стандарт VCH–1005, в "Старой Пустыни" – приёмник-синхронизатор с рубидиевым стандартом частоты VCH–311.

В качестве буферных блоков для формирования высокостабильных сигналов 5 МГц и 1 сек используются синхрометры Ч7–15 и Ч7–37. Сигнал "5 МГц" используется для синхронизации гетеродинов приёмной системы, сигнал "1 сек" подается на систему регистрации для синхронизации потока регистрируемых данных.

Запись данных осуществлялась в полосе 2 МГц с помощью системы регистрации NRTV – Near-Real Time VLBI (с записью на жесткий диск компьютера), разработанной в Институте радиоастрономии Италии (Ното, Дж. Туккари) [11]. При работе на базе "Зимёнки – Старая Пустынь" дополнительно в качестве контрольной использовалась система MARK–II (с записью на магнитные ленты).

Кроме того, для регистрации интенсивности излучения в каждом приёмном пункте использовались цифровые (электронные) самописцы, данные с которых записываются на жесткий диск компьютера. Применявшаяся в наших экспериментах до 2006 года в качестве основной система записи МК–II ограничена частотной полосой пропускания 2 МГц. Переход к системе записи NRTV позволил в 2007 году провести опытные эксперименты с полосой записи до 4 МГц.



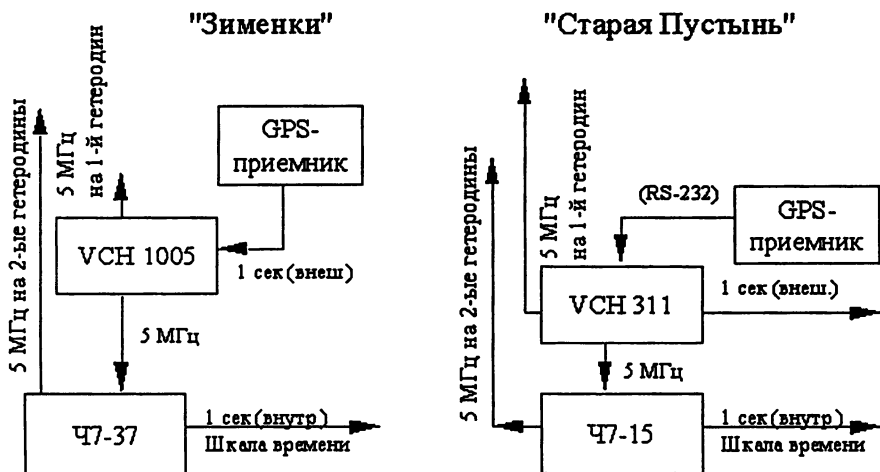


Рис. 14. Схемы синхронизации времени в приёмных пунктах РСДБ

Опыт эксплуатации NRTV-терминала показал необходимость как качественной сетевой развязки и стабилизации питания систем регистрации, так и модернизации системы синхронизации терминалов NRTV на пунктах из-за наличия сбоев привязки времени.

### 3. Проверка РСДБ аппаратуры на частотах 610 и 327 МГц на малой базе в РАО "Старая Пустынь"

В период с 8 по 28 июля 2008 года на РСДБ пунктах "Старая Пустынь" и "Зимёнки" были проведены работы, направленные на совершенствование и проверку приёмной и регистрирующей аппаратуры, а также на развитие методик прикладных и научных РСДБ исследований.

Измерения осуществлялись в двух частотных диапазонах (327 и 610 МГц) по следующей программе:

- тестовые измерения сигналов от мощных радиоисточников,
- наблюдения источников с точечной структурой с целью оценки чувствительности и калибровки базы радиоинтерферометра,
- наблюдения источников, расположенных на малых угловых расстояниях от Солнца с целью исследования плазмы солнечного ветра методом радиопросвечивания,
- наблюдения солнечного радиоизлучения с целью исследования коротких солнечных вспышек «спайков», в том числе для определе-

ния координат источника излучения и динамики его движения по диску Солнца.

Первый цикл измерений осуществлялся на малых базовых линиях длиной 70 м (в диапазоне 610 МГц) и 130 м (в диапазоне 327 МГц) с задействованием трех телескопов РТ-14, расположенных в "Старой Пустыни" (рис. 15). Радиотелескоп РТП-14, работающий как элемент РСДБ, был оснащен трехчастотным облучателем и задействован в данной серии измерений на двух частотах поочередно (327 и 610 МГц). На двух других антеннах были установлены облучатели на 327 и 610 МГц соответственно. На частоте 610 МГц измерения проводились на круговых поляризациях, на частоте 327 МГц – на линейной вертикальной поляризации из-за конструктивных особенностей облучающей системы антенны РТ14-1.

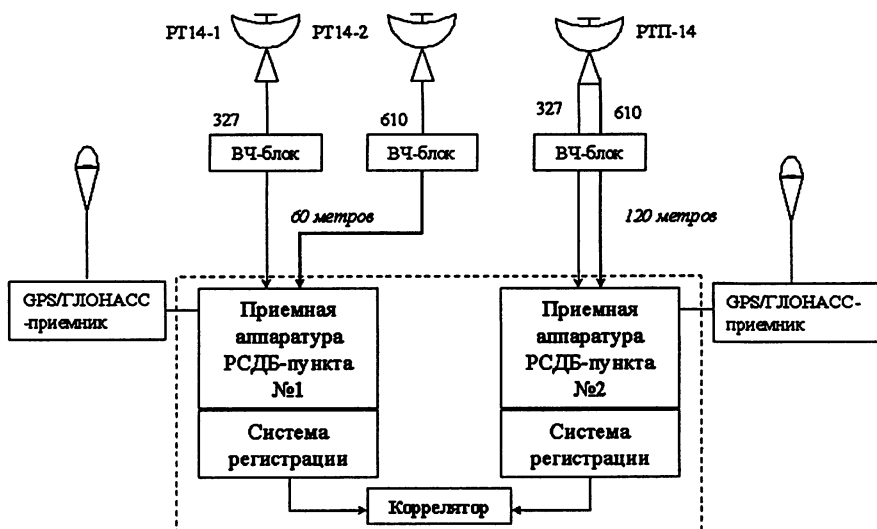


Рис. 15. Схема приёмного комплекса радиоинтерферометров с малой базой в РАО "Старая Пустынь"

Кроме наблюдений Солнца и космических радиоисточников, в каждом сеансе контролировалась помеховая обстановка и оперативно определялись угловые сектора, доступные для совместных наблюдений в режиме РСДБ. Основная обработка осуществлялась на корреляторе "НИРФИ-3" во время сеанса, либо непосредственно после его окончания.

Основная цель эксперимента – проведение тестовых испытаний всех систем приёмной и регистрирующей аппаратуры по сигналам радиоисточников.

При малой базе для получения корреляционного отклика было возможно использование всех радиоисточников, включая Солнце, т.е. внеземного источника с наибольшей интенсивностью. Выбор калибраторов с различной интенсивностью позволял точно вычислить инструментальные задержки и другие параметры аппаратуры после корреляционной обработки и определить чувствительность инструмента – минимально обнаружимый поток излучения. Это важно для работы на базе "Старая Пустынь – Зимёнки" (70 км), поскольку для ее калибровки необходимы "точечные" объекты, которые обычно имеют небольшую плотность потока излучения.

Проведение контрольных испытаний осуществлялось по следующей схеме:

- сигналы от антенн подаются на входы ВЧ блоков приёмников, передаются на промежуточной частоте в технологическое здание в "Старой Пустыни" (рис. 15) и преобразуются в видеочастоту; далее производится их запись на носители информации систем регистрации – магнитофонные ленты и жесткие диски ЭВМ;
- при обработке на корреляторе определяются аппаратурные сдвиги (пространственная и аппаратурная временная задержка, частотный сдвиг) сигналов и стабильность работы приёмной аппаратуры;
- процесс измерений повторяется при наблюдении все более слабых источников;
- по результатам проверки определяется готовность приёмно-регистрирующих комплексов к регулярным наблюдениям, определяются поправки в расчетные параметры РСДБ системы, вызванные аппаратурными факторами.

#### 4. Результаты измерений

В табл. 1 приведен список использованных в проведенном эксперименте источников с указанием плотностей потоков на двух рабочих частотах задействованных интерферометров. В группу радиоисточников-калибраторов для построения оптимального графика измерений вошли объекты с различными характеристиками.

После выполнения обработки экспериментальных данных были получены корреляционные отклики от радиоисточников в обоих диапазонах длин волн.

Таблица 1

Источник	S 327 МГц (Jy)	S 610 МГц (Jy)
3C48	38	30
3C123	135	100
3C147	57	30
3C161	50	35
3C196	56	30
3C273	65	57
3C274 Дева А	600	450
3C295	70	45
3C380	50	30
3C405 Лебедь А	5800	3450
3C461 Кассиопея А	6500	4000

На рис. 16–20 показаны амплитуды комплексной корреляционной функции в зависимости от величины задержки (в дискретах по 250 нс) при наблюдении радиоисточников Кассиопея А, Лебедь А на частотах 327 МГц (на линейной поляризации) и 610 МГц и источника Дева А на частоте 610 МГц.

По выполненным оценкам влияние угловых размеров этих источников несущественно, т.к. минимальный угловой размер интерференционного лепестка на обеих частотах около  $20'$ , размеры источников – в пределах  $4'$ . Тем не менее, сигнал от источника Лебедь А был больше, чем от источника Кассиопея А. Амплитуда корреляционной функции для Солнца (рис. 21) сравнима с сигналом от источника Кассиопея А, поскольку размеры Солнца превышают размеры лепестка и коррелированный поток существенно меньше полного.

Приведенные на рис. 22 спектры корреляционного сигнала для трех радиоисточников при оптимальной задержке демонстрируют хорошее отношение сигнал/шум.

На рис. 23 представлена амплитуда комплексной корреляционной функции для радиоисточника 3C123 с потоком около 100 Ян на частоте 610 МГц. Видно, что уровень сигнала превышает уровень шумов примерно в два раза. Т.е. минимально обнаружимый поток при данном комплекте аппаратуры можно оценить величиной порядка 100 Ян.

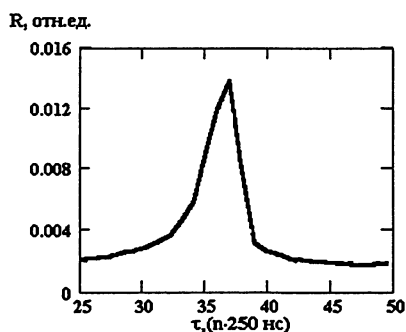


Рис. 16. Кассиопея А, 327 МГц

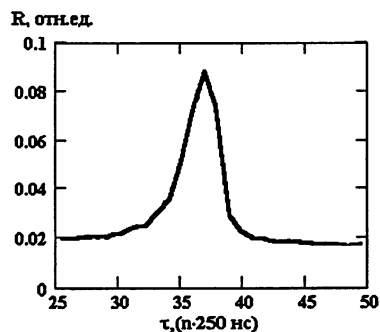


Рис. 17. Лебедь А, 327 МГц

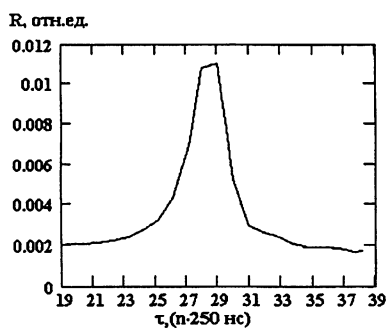


Рис.18. Кассиопея А, 610 МГц

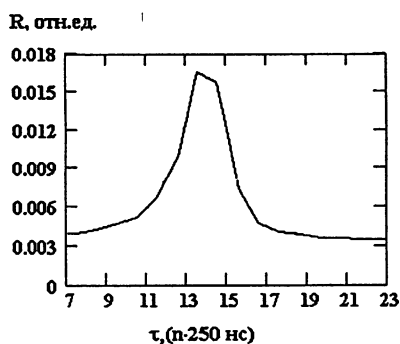


Рис. 19. Лебедь А, 610 МГц

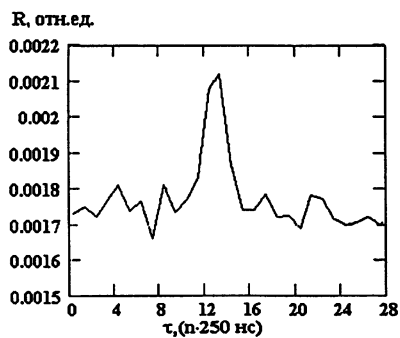


Рис. 20. Дева А, 610 МГц

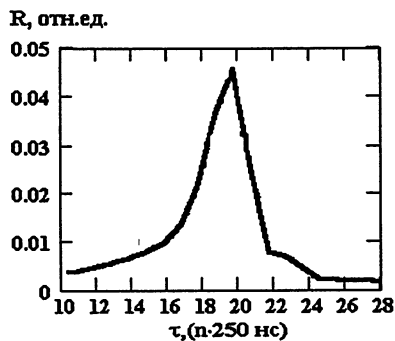


Рис. 21. Солнце, 610 МГц

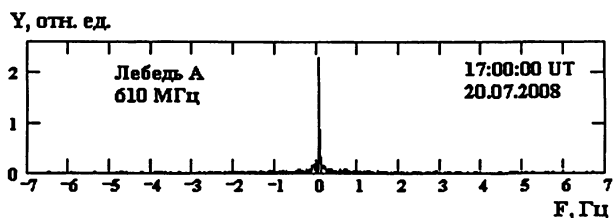
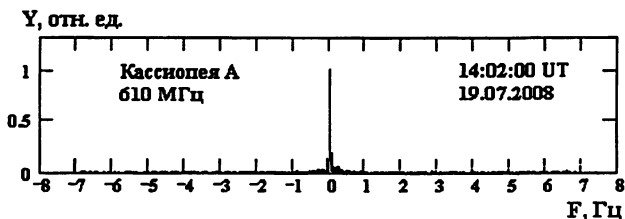
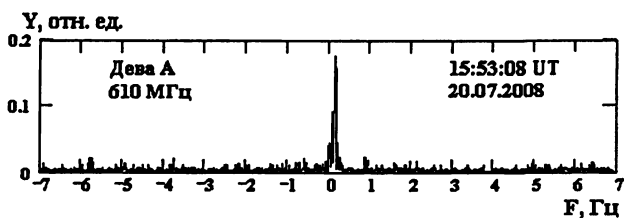


Рис. 22. Спектральный отклик интерферометра при приёме излучения радиоисточников на частоте 610 МГц

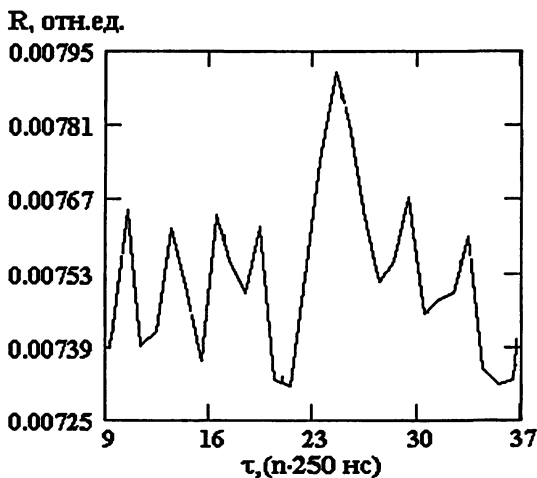


Рис. 23. Корреляционная функция для источника 3C123 на частоте 610 МГц

Учитывая большие потери сигнала в трактах антенн, работавших на отдельных частотах (более 3 дБ из-за расположения ВЧ блока в кабине на расстоянии около 10 м от облучателя), чувствительность по потоку РСДБ "Зимёнки – Старая Пустынь" по данным эксперимента оценивается величиной 50 Ян при времени накопления порядка 100 с. Расчетное значение значительно меньше.

При обработке импульсных сигналов, принятых в одном пункте на малой базе, также получены корреляционные отклики. На рис.24 показана амплитуда корреляционной функции при наблюдении Солнца на 610 МГц, видны два импульсных всплеска разной длительности при разных задержках ( $n=34$  и  $n=96$ , дискрет задержки равен 250 нс). На рис. 25 и 26 приведены спектральные интерферометрические отклики от импульсов. Этот пример показывает возможность обнаружения и обработки импульсных сигналов типа спайков.

### **Эксперимент на базе "Зимёнки – Старая Пустынь"**

Далее один комплект аппаратуры был перевезен в "Зимёнки" и проведен цикл наблюдений на РСДБ "Старая Пустынь – Зимёнки" на тех же рабочих частотах.

Во время проведения экспериментов по данным международной службы Солнца солнечных вспышек зарегистрировано не было из-за слабой активности Солнца. Однако, в процессе наблюдений на интерферометрах неоднократно отмечались импульсные сигналы (как одиночные, так и серии), в том числе одновременные для базы 70 км "Зимёнки – Старая Пустынь". Процесс обработки вспыхивающего излучения моделировался по этим сигналам, интерпретируемым как импульсные помехи. Данные будут опубликованы в отдельной статье.

Дополнительно проведены два цикла измерений помеховой обстановки на частотах 327 и 610 МГц в "Зимёнках" и "Старой Пустыни", что позволило выбрать частоты наблюдения, свободные от мощных радиопомех. Помеховая обстановка в пунктах наблюдения исследовалась с помощью регистрации сигнала на цифровой спектральный анализатор, позволяющий регистрировать спектры сигнала в полосе до 25 МГц. Принимаемый радиотелескопом с различных направлений сигнал на частотах в общей полосе приёма записывался в виде масштабированной картинкой на жесткий диск. Помехи определялись по выбросам в записанных спектрах. Пример помеховой обстановки в пункте "Зимёнки" на частоте 610 МГц показан на рис. 27.

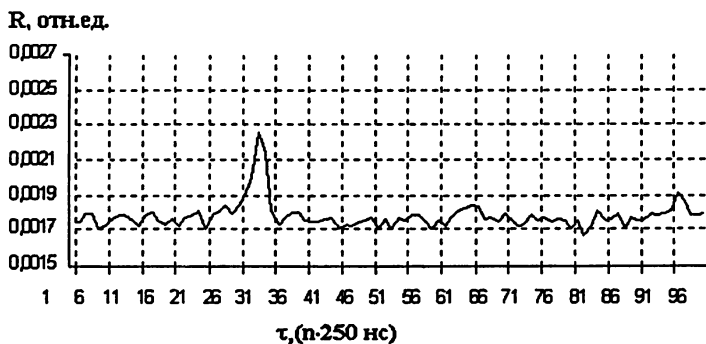


Рис. 24. Корреляционная функция в зависимости от задержки при приёме импульсных сигналов на частоте 610 МГц

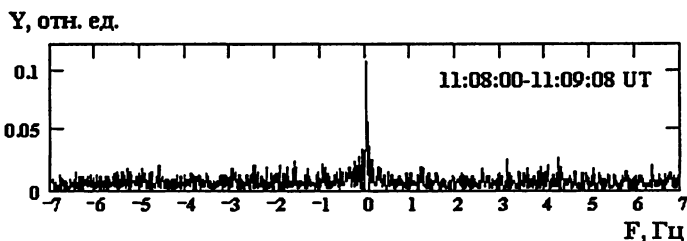


Рис. 25. Спектр мощности сигнала интерферометра при приёме импульсного всплеска при задержке 34 дискрета

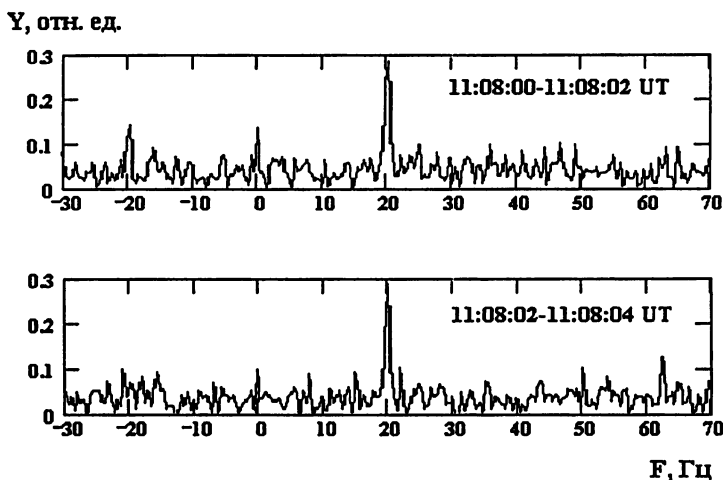


Рис. 26. Спектры мощности сигнала интерферометра для двух последовательных временных интервалов при приёме импульсного всплеска при задержке 96 дискретов



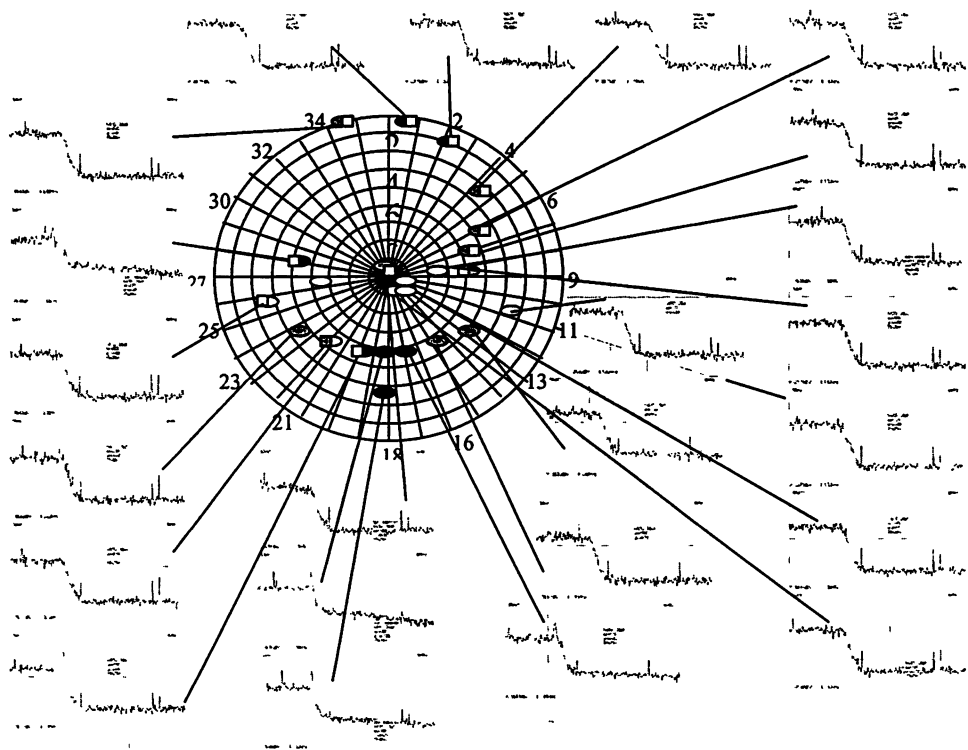


Рис. 27. Схема помеховой обстановки на пункте РСДБ "Зимёнки" на частоте 610 МГц. В прямоугольниках изображены спектры сигнала с различных направлений в полосе 6 МГц (окружностями отмечен угол места антенны, радиусами – азимуты).

### Заключение

Выполненные эксперименты и полученные результаты показали возможность получения новой научной информации о быстрых вспышечных процессах на Солнце с помощью радиоинтерферометров ФГНУ НИРФИ. В дальнейшем для получения более полной информации о наблюдаемых компактных источниках солнечного радиоизлучения (размерах, количестве одновременно возникающих спайков в ограниченной области, расстоянии между источниками, скорости их движения и др.) предполагается расширение имеющегося двухэлементного радиоинтерферометра до многоэлементного комплекса, состоящего из трех-четырех приёмных РСДБ пунктов и включающего крупные радиотелескопы (РТ-32, РТ-64, РТ-70).

## Литература

1. Алексеев В.А., Дугин Н.А., Липатов Б.Н., Мельников В.Ф., Снегирев С.Д., Тихомиров Ю.В. Радиоинтерферометрические наблюдения солнечных всплесков в дециметровом диапазоне с миллисекундным временным разрешением // Изв. ВУЗов Радиофизика. 1997. т.40, №9. с.1063–1072.
2. Нечаева М.Б., Антипенко А.А., Дементьев А.Ф., Дугин Н.А., Снегирев С.Д., Тихомиров Ю.В. РСДБ исследования в Научно-исследовательском радиофизическом институте // Изв. ВУЗов Радиофизика. 2007. т.50, №7. с.577–592.
3. Koch G. F. and Scheffer H. Coaxial radiator as feed for low noise paraboloid antennas // Nachrichtentech. Z. 1969. v.22. p.166–173.
4. Jeuken M. E. J., Knoblen M. H. M., and Wellington K. J. A dual frequency, dual polarized feed for radio-astronomical applications // Nachrichtentech. Z. 1972. v.25. p.374–376.
5. Livingston M. L. Multifrequency coaxial cavity apex feeds // Microwave J. 1979. v.22. p.51–54.
6. Bird T. S., James G. L., and Skinner S. J. Input mismatch of TE<sub>11</sub> mode coaxial waveguide feeds // IEEE Trans. Antennas Propagat. 1986. v.AP–34. p.1030–1033.
7. James G. L. Admittance of Irises in Coaxial and Circular, Waveguides for TE<sub>11</sub>-Mode Excitation // IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques. 1987. v.MTT–35. №4, p.430–434.
8. Savini D., Figlia G., Ardenne A.V., Klooster K.V. A Triple Frequency Feed for the QUASAT Antenna // Ant. and Prop. Society Intern. Symp. 1988. AP–S. Digest Volume. Issue 6–10 Jun 1988. v.1. p.342–345.
9. Bird T.S. TE<sub>11</sub> mode excitation of flanged circular coaxial waveguides with an extended centre conductor // IEEE Trans. Antennas Propagat. 1987. v.35. p.1358–1366.
10. Thomas B. MacA., Theoretical performance of prime-focus paraboloids using cylindrical hybrid-mode feeds // Proc. Inst. Elec. Eng. 1971. v.118. p.1539–1549.
11. G. Tuccari, Molotov I., Buttacio S., Gorshenkov Yu., Liu X., Hong X., Nechaeva M., Nicotra G., Volvach A. E-LFVN – An Internet Based VLBI Network // Proceedings of the 3rd e-VLBI Workshop, Makuhari, October 6–7, 2004. International VLBI Service for Geodesy and Astrometry, NICT Technology Development Center News №25, November 2004. National Institute of Information and Communications Technology, Tokio, Japan. p.59–63.

## Содержание

Введение.....	3
1. Трехчастотные облучатели антенн РТ–14 и РТ–15.....	4
1.1. Исходная конструкция многочастотного облучателя .....	4
1.2. Модернизация согласующей системы коаксиального облучателя .....	8
1.3. Характеристики коаксиального облучателя.....	9
2. Приемная аппаратура.....	12
2.1. ВЧ блоки .....	12
2.2. Четырехканальный видеоконвертер .....	13
2.3. Система синхронизации времени и система регистрации .....	17
3. Проверка РСДБ аппаратуры на частотах 610 и 327 МГц на малой базе в РАО "Старая Пустынь" .....	18
4. Результаты измерений.....	20
Заключение .....	26
Литература .....	27