

Министерство образования и науки РФ

**Федеральное государственное научное учреждение
Научно-исследовательский радиофизический институт**

Препринт № 536

**Юстировка антенн и калибровка РСДБ НИРФИ
по сигналам космических аппаратов
СРНС ГЛОНАСС и НАВСТАР**

**Антипенко А.А.
Дементьев А.Ф.
Дугин Н.А.
Нечаева М.Б.
Тихомиров Ю.В.
Чагунин А.К.**

**Нижний Новгород
2011**

Антипенко А.А., Дементьев А.Ф., Дугин Н.А., Нечаева М.Б., Тихомиров Ю.В., Чагунин А.К. «Юстировка антенн и калибровка РСДБ НИРФИ по сигналам космических аппаратов СРНС ГЛОНАСС и НАВСТАР» – Препринт № 536. Нижний Новгород, 2011, 32с.

Приводятся результаты работ на радиоинтерферометре с независимым приемом, созданном на базе антенн, разнесенных на 70 км, которые расположены в радиоастрономических обсерваториях (РАО) НИРФИ «Старая Пустынь» (РТ-14) и «Зименки» (РТ-15).

РСДБ НИРФИ в 2010 году был дооснащен приемной аппаратурой на частоту 1.6 ГГц. Первые эксперименты по вводу в действие приемного комплекса на новой частоте проводились по мощным сигналам навигационных космических аппаратов (НКА) спутниковых радионавигационных систем (СРНС) ГЛОНАСС и GPS (НАВСТАР). Отрабатывались методики работы по сигналам НКА СРНС, в числе которых основными были: процедура выбора требуемого НКА и определения целеуказания антенн, определение разъюстировки антенн, определение параметров инструмента.

Рассмотрены приемная аппаратура на 1.6 ГГц и терминал регистрации ТН-16, разработанный в НИРФИ. Приводятся результаты экспериментов по измерению разъюстировки антенн РТ-14 и РТ-15 в РАО «Старая Пустынь» и «Зименки» по сигналам НКА ГЛОНАСС и НАВСТАР и некоторые результаты корреляционной обработки данных РСДБ измерений этих КА.

Авторы благодарят профессора В.А. Разина, Т.С. Подстригача и сотрудников РАО «Старая Пустынь» и «Зименки» за помощь в осуществлении экспериментов.

Работа поддержана грантами РФФИ № 09-02-01078-а, 10-02-00875 и Государственным контрактом № П683 от 20 мая 2010г. на выполнение поисковых научно-исследовательских работ по направлению «Астрономия, астрофизика и исследования космического пространства» в рамках мероприятия 1.2.1 ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы.

Радиоинтерферометр НИРФИ независимого приема включает радиотелескопы диаметром 15 и 14 м, разнесенные на расстояние 70 км и расположенные в РАО «Зимёнки» и «Старая Пустынь». Инструмент с относительно невысоким для РСДБ угловым разрешением первоначально предназначался для исследований вспышечных процессов в солнечном радиоизлучении, которые проводятся в ФГНУ НИРФИ в последние десятилетия. Такие исследования направлены на получение детальных характеристик этих процессов, при этом особое внимание уделяется изучению их тонкой временной и пространственной структуры методом РСДБ в дециметровом диапазоне длин волн. Наблюдения компактных источников радиоизлучения во время солнечных вспышек на РСДБ НИРФИ были начаты в 2006 году [1,2] на частотах 327 и 610 МГц..

По мере оснащения инструмента современной высокочувствительной аппаратурой и развития кооперации с международной сетью РСДБ появилась возможность существенно расширить класс решаемых задач, рассматривая РСДБ НИРФИ как «тестовый» комплекс для отработки элементов аппаратуры, методик корреляционной и спектральной обработки данных при решении различных научных и прикладных задач.

При эксплуатации инструмента на частотах 327 и 610 МГц основной проблемой являлся высокий уровень помех в пункте «Зименки», расположенном в непосредственной близости от городов Нижний Новгород и Кстово. Помехи затрудняют прием слабых сигналов от внеземных калибровочных радиоисточников и, как следствие, не позволяют провести калибровку инструмента с необходимой точностью. Поэтому основной задачей являлось оснащение инструментов приёмной аппаратурой для работы в диапазоне, свободном от помех.

В 2010 году были изготовлены два комплекта приемников на частотный диапазон 1.6 ГГц и проведена подготовка РСДБ НИРФИ к работе на этой частоте. Приемники имеют возможность перестройки частотных поддиапазонов на 1665 ± 20 МГц (радиоастрономическая частота) и на 1565-1615 МГц (рабочие частоты НКА СРНС ГЛОНАСС и GPS). Возможность работы по сигналам НКА СРНС закладывалась с целью проведения экспериментов по высокоточному определению положения (координат) КА с помощью РСДБ как задача эфемеридной поддержки ГЛОНАСС. Использование РСДБ технологии для высокоточного определения координат навигационных КА системы ГЛОНАСС позволяет апро-

бировать методы измерений, альтернативные штатным и дополняющие их, что может существенно повысить эффективность и конкурентоспособность отечественной СРНС.

В первых экспериментах работа по мощным сигналам НКА существенно упрощала процедуру определения параметров приемного комплекса. Были выполнены следующие работы:

- настройка трехчастотных облучателей приемных антенн РТ-14 и РТ-15 на частоту 1.6 ГГц,
- измерение разъюстировки и параметров антенн по Солнцу и НКА;
- отработка в полевых условиях нового терминала системы регистрации сигналов на жесткие диски компьютера при работе в полосе от 2 до 8 МГц;
- отладка методик обработки РСДБ-данных при приеме радиоизлучения квазишумовых сигналов КА.

Натурные испытания приемной и регистрирующей аппаратуры при подготовке к одновременным трехчастотным (327, 610 и 1660 МГц) наблюдениям Солнца, калибровочных источников и КА позволили определить характеристики аппаратуры и инструмента в целом, а также отработать различные режимы измерений в квазиреальном времени и модернизировать программы обработки данных.

1. Приемная и регистрирующая аппаратура

Общая блок-схема приемных комплексов на пунктах РСДБ НИРФИ является стандартной (см. работу [1]). Отдельные элементы постоянно совершенствуются или заменяются новыми с целью повышения эффективности РСДБ исследований, которая тесно связана, в первую очередь, с увеличением чувствительности приемной аппаратуры. Это было достигнуто путем снижения шумовой температуры приемников (за счет применения современных неохлаждаемых малощумящих усилителей (МШУ) с $T_{ш} < 80$ К на частотах 327 и 610 МГц и $T_{ш} \sim 100$ К на частоте 1.6 ГГц) и расширения полосы приема и регистрации.

1.1. ВЧ аппаратура на частоту 1.6 ГГц

В состав каждого высокочастотного (ВЧ) приемного модуля входят:

- ВЧ-блоки, включающие следующие основные элементы: МШУ с возможностью смены входных фильтров для работы отдельно по сигналам НКА ГЛОНАСС, НАВСТАР и радиоисточникам, смесители, предварительные усилители промежуточной частоты (УПЧ),
- блок гетеродинов на две рабочих частоты.

Основные технические характеристики генераторов частот (гетеродинов):

- рабочие частоты: 1500 и 1420 МГц;
- мощность выходного сигнала: не менее 10 мВт;
- относительный уровень дискретных составляющих: (- 45) дБ;
- относительная спектральная плотность мощности (СПМ) фазовых шумов при отстройке 100 Гц: (-60) дБ/Гц;
- частота опорного сигнала: 5 МГц;
- минимальный уровень опорного сигнала: 0.5 В.

Основные технические характеристики ВЧ-блоков:

- диапазон входных частот: (1555 – 1685) МГц;
- полоса частот УПЧ: (140-210) МГц;
- коэффициент передачи: 50 дБ;
- неравномерность коэффициента передачи в рабочей полосе: 2 дБ;
- динамический диапазон: 35 дБ;
- коэффициент собственного шума неохлаждаемых МШУ: ≤ 1 дБ;
- ослабление входного направленного ответвителя: 20 дБ, прямые потери не более 0.2 дБ.

Применение двух частот гетеродина обусловлено необходимостью работы как по сигналам НКА СРНС (частота гетеродина 1420 МГц), так и по внеземным радиоисточникам в выделенном для радиоастрономии международном диапазоне 1665 ± 20 МГц (частота гетеродина 1500 МГц). Переключение частоты гетеродина производится дистанционно от блока питания ВЧ-блока, установленного в технологической кабине радиотелескопа.

Схема преобразования частот РСДБ в диапазоне 1.6 ГГц показана на рис. 1. Субблоки ВЧ части аппаратуры были разработаны и изготовлены ЗАО «Салют-27» по ТЗ НИРФИ. Три основные субблока ВЧ – модули МШУ, преобразователя (смесителя) и гетеродинов, – смонтированы в одном корпусе (фото 1), который устанавливается в фокальной области антенны непосредственно за облучателем.

Входной сигнал от квадратурного моста (преобразователя линейных поляризаций в круговые) поступает на вход МШУ. Модули МШУ и преобразователя частот (ПЧ) выполнены отдельно для возможности установки на выходе МШУ перестраиваемых фильтров на три рабочих поддиапазона – 1575 МГц (НАВСТАР), 1601 МГц (ГЛОНАСС) и 1665 МГц (радиоастрономическая частота).

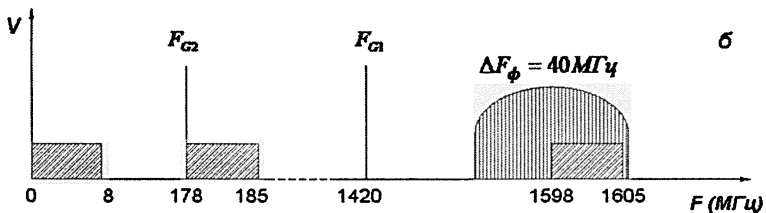
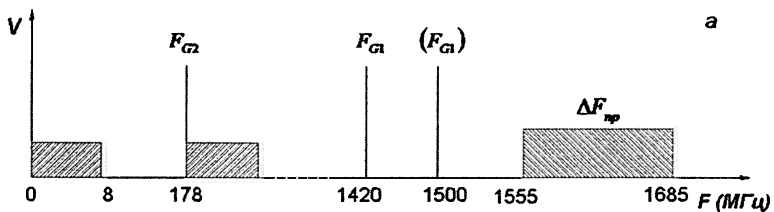


Рис.1. Схема преобразования частот в РСДБ-комплексе НИРФИ
 а) общая схема, б) схема приема сигналов НКА ГЛОНАСС
 с внешним фильтром

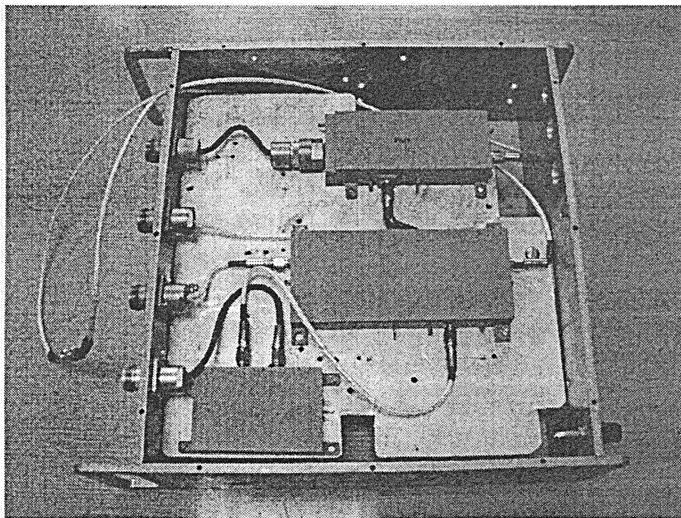


Фото 1. Приёмник на 1.6 ГГц

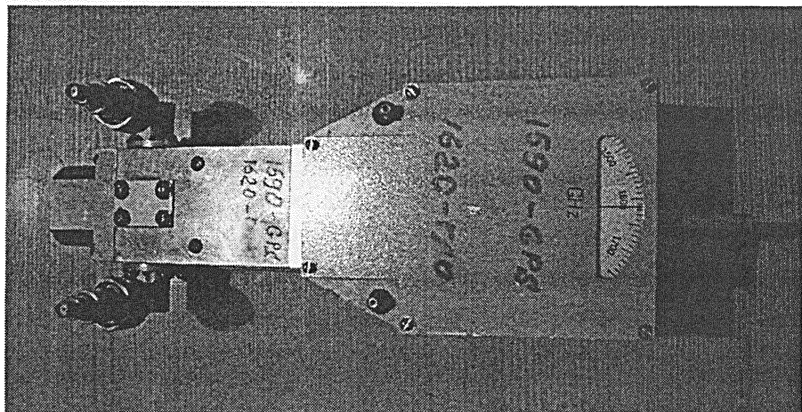


Фото 2. Перестраиваемый ВЧ-фильтр на диапазон 1.6 ГГц

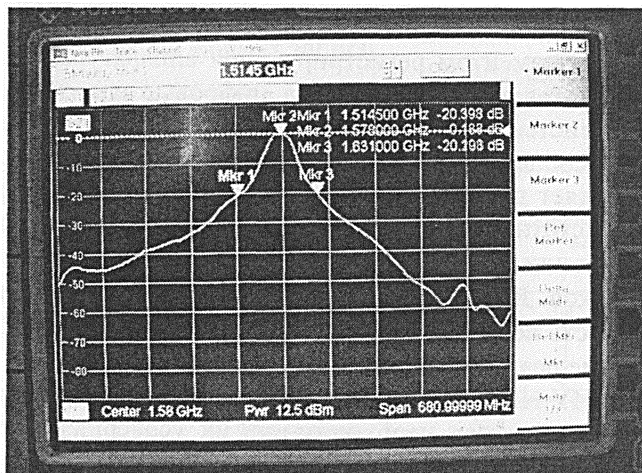


Рис.2. АЧХ МШУ с фильтром

В качестве фильтров высоких частот на первом этапе работ применялись перестраиваемые ВЧ-фильтры от серийных радиометров ПК7-18, полоса пропускания фильтров около 40 МГц на уровне 3 дБ, потери 0.4 дБ (фото 2). Фильтры располагались вне основного корпуса ВЧ-блока для обеспечения оперативного доступа к ним во время эксперимента.

Лабораторные испытания приемного комплекса в частотном диапазоне 1.6 ГГц проведены изготовителем и в лаборатории РСДБ НИРФИ. Цель испытаний – установление соответствия технических характеристик

изготовленных ВЧ-блоков условиям Технического задания и проверка стабильности работы в течение длительного срока, поскольку в полевых условиях срок непрерывной работы ВЧ-аппаратуры может достигать нескольких суток или недель.

Результаты показывают, что практически все условия ТЗ изготовителем выполнены. Только сквозная полоса обоих МШУ превысила заданную примерно на 25 МГц; однако, это существенно не повлияло на основные характеристики приемника.

Были измерены амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) и коэффициенты усиления МШУ и преобразователя частот, параметры блока гетеродинов. С помощью внешнего ГШ измерена температура шума всей системы, которая получилась равной 100 К, или 1.3 дБ, что соответствует протоколам измерений изготовителя. На рис. 2 для примера показана АЧХ МШУ с фильтром на экране спектроанализатора R&S ZVL100A.

1.2. Терминал записи данных

Основным элементом регистрирующей аппаратуры является терминал записи квантованного сигнала на цифровые носители информации. Современные системы регистрации радиоинтерферометрических данных основаны на использовании жёстких дисков компьютера большой ёмкости, что позволяет достичь высокой чувствительности измерений за счёт расширения частотной полосы регистрации, увеличения скорости записи данных на диск или использования параллельной записи одновременно на несколько дисков. Кроме того, системы регистрации должны предоставлять возможность передачи файлов данных в центр обработки по сети Интернет в режиме реального или квазиреального времени.

Опыт ФГНУ НИРФИ эксплуатации простейших существующих систем регистрации показал необходимость их усовершенствования, в том числе исправления следующих выявленных недостатков:

- высокого процента сбоя информации;
- периодического сбоя синхронизации;
- отсутствия индикации при потере синхронизации;
- малой механической надежности конструкции;
- высокой стоимости.

В лаборатории РСДБ была проведена разработка собственного терминала ТН-16, который в настоящее время проходит испытания в экспериментах. Структурная схема терминала записи РСДБ-данных приведена на рис. 3. По данной схеме была разработана принципиальная схема устройства ТН-16, которое преобразует принятый на данном пункте наблю-

дения аналоговый сигнал в цифровой вид с синхронизацией потока данных по времени от высокостабильного стандарта частоты и времени, передаёт их на компьютер для хранения и передачи в центр сбора информации. Изготовлено устройство, состоящее из двусторонней печатной платы с смонтированными элементами, в металлическом корпусе с разъёмами для специального двойного кабеля связи с платой PCI-7200, встроенной в системный блок компьютера.

Терминал ТН-16 разрабатывался исходя из общей стратегии возможности применения в системе регистрации стандартных компьютеров, поддерживающих операционную систему Windows. Терминал предназначен для ввода аналоговой информации с конвертера, преобразования её в цифровую форму (в первом варианте – двухуровневое квантование) и передачи данных на интерфейс параллельного ввода.

Для ввода информации в компьютер используется плата цифрового ввода-вывода PCI-7200 фирмы ADLINK Technology inc. В комплект поставки включена библиотека подпрограмм для трансляторов C++, Delfi, BASIK, которая определила формат записи.

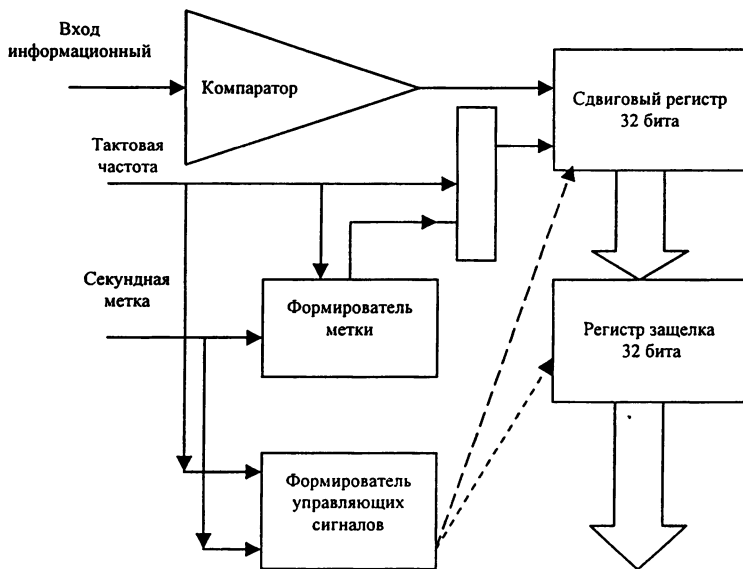


Рис. 3. Функциональная схема терминала регистрации ТН-16

Требования к входным и выходным сигналам определяются характеристиками конвертера и техническими параметрами интерфейса PCI-7200.

Параметры входного сигнала:

- амплитуда 0.1...1.5 В;
- частотный диапазон 50...8000 кГц.

Параметры выходного сигнала:

- параллельный цифровой код в виде 32-х битных слов;
- уровни сигналов ТТЛ логики (0.5...4.0 В).

Применяется следующий алгоритм ввода информации с конвертера в компьютер (рис. 4). Информации вводится в компьютер по синхросигналам, поступающим со стандарта частоты и времени на пункте регистрации. Для синхронизации с секундной меткой стандарта частоты и времени используется принцип триггера. Программа выставляет триггер в «1» на момент времени, соответствующий времени старта записи. По секундной метке от стандарта триггер переходит в состояние «0» и даёт старт записи сигнала в оперативную память компьютера. После заполнения буфера памяти (65 МБ) запись останавливается, и далее производится сброс информации на жёсткий диск. Далее цикл повторяется до окончания расписания сеанса наблюдений. Во время сброса данных на жёсткий диск останавливается запись поступающего с приёмника сигнала, что приводит к потере информации в данных интервалах. Для устранения этого недостатка применяется два режима работы: калибровочный (с потерей части информации) и основной.

Ниже представлены схемы подключения терминала для двух режимов работы. На рис. 5 показан вариант калибровочного режима. Запись производится на компьютер №1 с перерывами на сброс информации на жёсткий диск. На рис. 6 – вариант рабочего режима приёма. В этом случае регистрация на компьютер №2 производится со сдвигом по времени. При объединении файлов, записанных на компьютер №1 и №2, обеспечивается непрерывная запись принимаемых данных и потерь не происходит.

Для успешной эксплуатации устройства разработаны инструкции по подключению терминала и составлению программы записи.

Инструкция по подключению терминала ТН-16

1. Подключить разъём связи с компьютером (специальный плоский разъем с шлейфом из двух многожильных кабелей для соединения с платой PCI-7200, вставляемой в системный блок ПК).

2. Соединить кабель с меткой CN2 с разъёмом на основной плате PCI-7200, кабель с меткой CN1 – с дополнительным разъёмом платы PCI-7200.

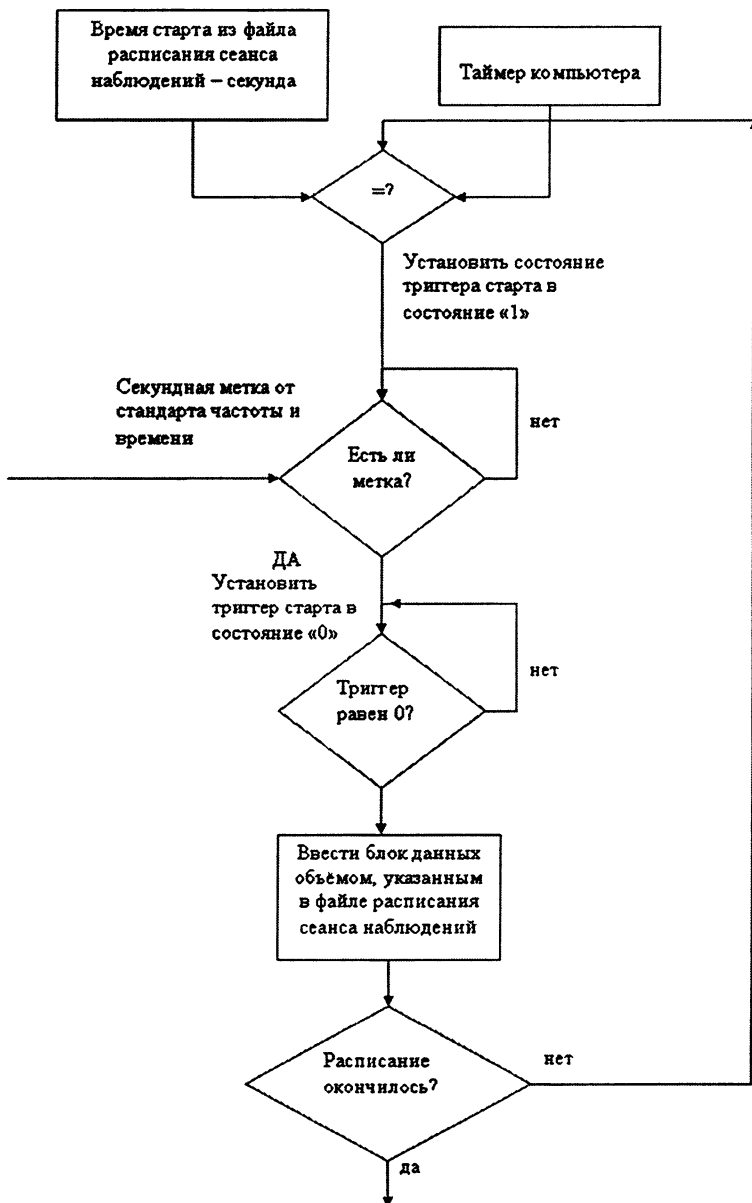


Рис. 4. Блок-схема алгоритма работы терминала ТН-16

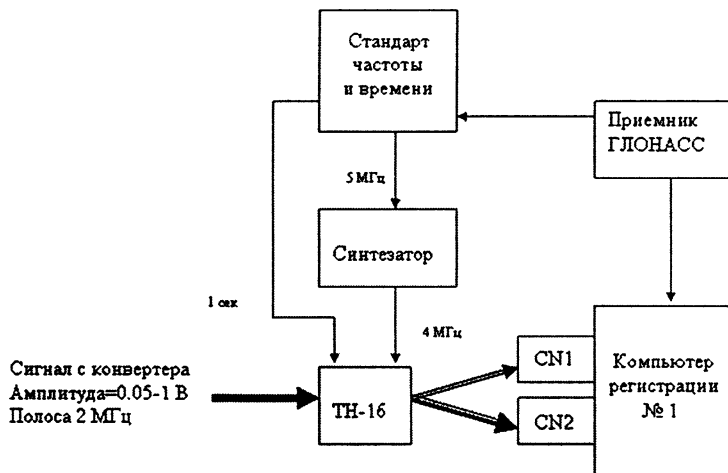


Рис. 5. Схема подключения терминала ТН-16 при калибровочном режиме

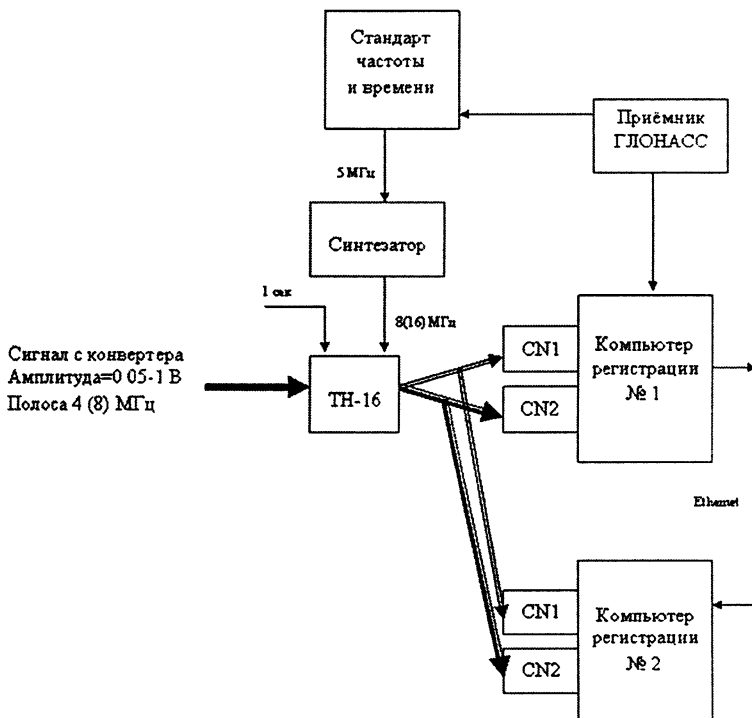


Рис 6 Схема подключения терминала ТН-16 в рабочем режиме

3. Выполнить кабельные соединения на передней стенке ТН-16 согласно надписям на верхней крышке: «+5В» – питание, «сек» – секундная метка от стандарта частоты и времени, «F_{такт}» – тактовая частота, синхронизированная со стандартом частоты и времени, «Vх» – входной сигнал амплитудой (0.1...0.9 В). После подачи питания и всех указанных сигналов должен включиться и мигать с частотой 0.167 Гц светодиод на передней панели ТН-16.

4. Проверить с помощью осциллографа контрольный сигнал на последнем (слева-направо) разъёме. Должны наблюдаться импульсы частотой 1/32 от тактовой частоты.

Предельные значения сигналов:

Тактовая частота – сигнал синусоидальной формы 1-16 МГц с амплитудой 1-5 В.

Секундная метка – произвольной длительности «положительный» импульс амплитудой 1-5 В.

Информационный сигнал амплитудой от 50 мВ до 1 В.

Примечание. В некоторых компьютерах наблюдалось, что терминал мешает первоначальному запуску. Чтобы избежать этого питание на терминал следует подавать после включения компьютера и загрузки ОС.

Инструкция по запуску регистрации на терминале ТН-16

До запуска программы записи на терминале необходимо:

1. Запустить программу привязки часов компьютера к секундной метке от стандарта частоты и времени. Коррекция должна осуществляться 1 раз в 2 минуты.

2. В 0-ую секунду нажатием кнопки, расположенной на боковой панели ТН-16, синхронизировать метку терминала. При этом светодиод должен мигать в 0, 6, 12, 18-ую и т.д. секунды (1 раз в 6 секунд).

Программа записи NRTV.exe

Программа NRTV.exe должна находиться в отдельном каталоге вместе с соответствующими DLL библиотеками. В этот же каталог будут записываться информационные файлы.

После запуска программы появляется рабочее окно. Поле «MODE» служит для выбора режима работы. Программа NRTV.exe используется в двух режимах: тестовом – NO WAIT (для начала записи по нажатию кнопки START) и в рабочем «SHEDULE».

1) Если выбран режим NO WAIT, то в следующих полях необходимо ввести дополнительную информацию:

– в поле «Experiment Name» ввести двухсимвольное название пункта, например, VN.

- в поле «Cycles» ввести 1,
- в поле «Readings» ввести длительность одного файла записи в 32-битных словах, например, 1024.

Для начала регистрации нажать в рабочем окне кнопку «START».

2) В режиме SHEDULE в поле "Input" необходимо ввести имя файла с расписанием, расположенного в той же папке, что и программа NRTV.exe. Для начала регистрации нажать в рабочем окне кнопку «START». Программа находится в режиме ожидания до начала момента записи. После начала записи в окне «Output filename» появится имя записанного файла.

Составление расписания наблюдений:

Программа NRTV.exe в основном режиме (SHEDULE) работает по заранее составленному расписанию. Расписание представляет собой текстовый файл, в котором одна строка соответствует одному файлу записи.

Формат строки файла SHEDULE:

ИМЯ ПУНКТА (два символа), пробел, ГОД (4 символа), пробел, МЕСЯЦ (2 символа), пробел, ЧИСЛО (2 символа), пробел, ЧАС (2 символа), пробел, МИНУТЫ (2 символа), пробел, СЕКУНДЫ (2 символа), пробел, 000001, длительность записи (10 символов).

Пример: VN 2011 08 07 17 57 10 000001 0012500000

Данная строка означает, что запись должна быть начата в пункте «VN» 7-го августа 2011 года в 17 часов 57 минут 10 секунд.

Длительность записи указывается в 32-х битных словах. Длительность одного слова равна периоду тактовой частоты, умноженному на 32. Для тактовой частоты в 4 МГц: $250 \text{ нс} * 32 = 8 \text{ мкс}$. Т.е. указанное в примере число 0012500000 соответствует 100 секундам непрерывной записи. Максимальное число равно 1500000, что соответствует 120 секундам записи. Однако в связи с тем, что компьютеру необходимо некоторое время для сброса принятой информации на жесткий диск, максимальная длительность никогда не используется. Время сброса зависит от типа компьютера и операционной среды. Нужно обратить внимание на то, что запись должна начинаться на всех РСДБ-пунктах в один момент времени.

Пример расписания:

VN 2011 08 07 17 00 00 000001 0014500000

VN 2011 08 07 17 02 00 000001 0014500000

VN 2011 08 07 17 04 00 000001 0014500000

VN 2011 08 07 17 06 00 000001 0014500000

По данному расписанию будут произведены 4 записи через каждые 2 минуты, длительность каждой записи составит 116 сек. Расписание можно

подготовить с помощью любого текстового редактора вручную. Кроме того, можно использовать прилагаемые программы GEN_SH4 (8;16).

Использование программы GEN_SH4 (SH8, SH16):

Вызвать программу GEN_SH4.exe. На запрос программы ввести необходимые данные. В результате будет сформирован файл с именем SHED4.txt, имя которого указывается в рабочем окне программы TN16.exe в поле "Shedule".

Формат файлов записи

Имя файла состоит из следующих составляющих:

имя пункта (два символа), «_», день от начала года (3 цифры), «_», время записи (6 цифр без пробела: часы, минуты, секунды), «_1.DAT».

Пример: VN_218-073421_1.dat – имя файла означает, что запись выполнена в пункте с именем VN в 218 день, запись начата в 7 часов 34 минуты 21 секунду.

Содержимое файла:

1. «Шапка» длиной 60 символов: «ADLINKDAQ1 дата время 1»
2. Далее идет собственно информационный сигнал – последовательность битов (0/1), квантованных согласно тактовой частоте. Количество битов в записи равно ее длительности, умноженной на тактовую частоту.

Перед началом эксперимента:

1. Проверить наличие достаточного свободного места на жестком диске для сеанса наблюдений.

2. Убедиться, что программное обеспечение для PCI-7200 верно сконфигурировано. Для этого вызвать программу 7200Cwav.exe из каталога ADLINK\PCI-DASK\SAMPLES\7200\SDK7200DbfWav. (Номер карты выбрать равным 0). Если программа не запускается, вызвать утилиту конфигурации W2_KPciUtil.exe из каталога ADLINK\Utility. Для утилиты указать имя карты PCI-7200, буфер ввода 60000, буфер вывода – произвольный. Перезагрузить компьютер и повторить пункт 2.

3. Выполнить проверку записи информации:

3.1. Проверка синхронизации: вызвать программу NRTV.exe в режиме NO WAIT с произвольным именем эксперимента и произвольной длиной записи. Отключить один из синхросигналов (секундная метка или тактовая частота) и нажать START. Программа будет находиться в режиме ожидания до тех пор, пока сигнал не будет подключен. Проверить таким образом оба синхросигнала.

3.2. Проверка достоверности ввода: с подключенными синхросигналами провести аналогичную операцию, но предварительно подать на вход сигнал 1 МГц синусоидальной формы амплитудой 0.1-0.8 В. Вызвать с

помощью любого имеющегося в наличии текстового редактора полученный файл на просмотр. Желательно, чтобы редактор позволял просмотр в шестнадцатиричном (HEX) формате.

Содержимое файла должно выглядеть как периодически повторяющаяся последовательность. Например, для тактовой частоты 4 МГц и при сигнале 1 МГц в HEX- виде будет записана последовательность:

СС СС СС или 33 33 33 или 66 66 66 и т.д..

Существенно, чтобы эта последовательность не разрывалась в течение всей длины файла.

Испытания терминала записи

Лабораторные испытания терминала записи проводились на макете РСДБ-интерферометра. Полезный сигнал подавался на входы ВЧ-блоков приёмной аппаратуры от внешнего генератора шума (ГШ). Запись производилась для различных режимов по полосе частот приёмника и тактовой частоты системы регистрации. Проведены также натурные испытания терминала записи в экспериментах на РСДБ НИРФИ и в составе международной РСДБ-сети по научным программам. Радиоинтерферометр НИРФИ оснащён водородным VCH-1005 и рубидиевым VCH-311 стандартами частоты и времени с синхронизацией местных шкал времени по сигналам СРНС ГЛОНАСС и GPS. Запись данных осуществлялась в полосе регистрации 2 и 8 МГц с помощью двух систем регистрации – MARK-II (контрольная) и ТН-16. В последующих экспериментах будет проводиться проверка терминала в разных режимах работы, будут выявляться недостатки и пути совершенствования оборудования. Основной задачей при модернизации терминала является достижение возможности работы с тактовой частотой 32 МГц (полоса приема 16 МГц) и увеличению чувствительности устройства за счет выбора современных компараторов квантования сигнала.

2. Юстировка антенн РСДБ НИРФИ на частоте 1.6 ГГц

Основной проблемой при работе на частоте 1.6 ГГц являлось то, что приводные системы антенн РТ-14 и РТ-15 в пунктах Старая Пустынь и Зименки рассчитаны по точностным характеристикам на низкочастотные диапазоны, а частота 1.6 ГГц близка к предельной, что затрудняет точное сопровождение источника длительное время.

Кроме того, на РТ-15 отсутствует система движения для фокусировки облучателя. На РТ-14 возможность подстройки положения облучателя вдоль оси зеркала существует, но здесь также потребуются дополнительные усилия для определения оптимального положения системы облуче-

ния. Из-за этих факторов в первых экспериментах на частоте 1.6 ГГц были заметны потери сигнала при наблюдении внесемных калибровочных источников.

Апробация измерительно-вычислительного комплекса (ИВК) проводилась в два этапа. Первоначально работа велась без ВЧ-фильтра в широкой полосе приема (около 150 МГц) по фоновому излучению и по Солнцу (рис. 7, 8). Данный эксперимент имел цель определить работоспособность радиотелескопов и оценить основные параметры – ДН, КПД, шумовую температуру. На рис. 7 показана одна из первых реализаций записи ДН по азимуту антенны РТ-14, измеренной по Солнцу методом «на прохождение», когда антенна устанавливается в упреждающую точку по ходу движения источника и остается неподвижной все время прохождения источника через ДН (скорость источника по высоте в кульминации была близка к нулю). В этом случае нет погрешностей записи, вызываемых неточностью сопровождения источника приводными системами антенны. Основное условие реализации метода – достаточная скорость движения источника. На рис. 8 показана ДН «на прохождение» по углу места при сопровождении источника по азимуту – видны погрешности наведения на источник, вызванные тем, что ширина ДН сравнима с точностью приводных систем.

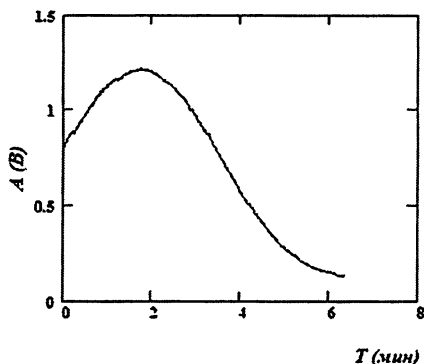


Рис. 7. Диаграмма направленности по азимуту, измеренная по Солнцу методом «на прохождение» на частоте 1600 МГц в Старой Пустыни.

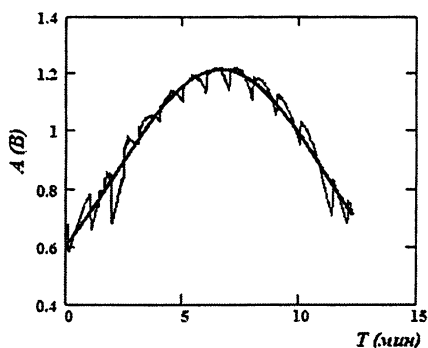


Рис. 8. Диаграмма направленности по углу места, измеренная по Солнцу на частоте 1600 МГц в Старой Пустыни.

Полуширина ДН (ширина на уровне половинной мощности), измеренная по Солнцу, получилась равной 1.25° при расчетном значении 0.9° . Небольшое уширение ДН обусловлено большим угловым размером Солн-

ца ($\sim 32'$), однако, основная причина – неоптимальное облучение зеркала: широкий главный лепесток и малый уровень боковых (см.ниже) показывают, что зеркало недооблучено.

Для работы по КА был установлен ВЧ-фильтр в положение 1595 МГц (центральная частота) для приема сигналов НКА обеих навигационных систем: при этом «захватывалась» центральная частота НКА "Навстар" навигационной системы GPS - 1575 МГц и полоса приема от 1570 до 1585 МГц, в полосу приема входили все частоты НКА навигационной системы ГЛОНАСС от частоты 1598 до 1610 МГц. Данная процедура была применена для ускорения процесса отработки приема сигналов НКА, т.к. подстройка фильтра на точные полосы либо ГЛОНАСС, либо GPS потребовала бы много времени на установку антенн в исходное положение и доступа к фокальному блоку. Поскольку НКА обеих навигационных систем излучают сигналы с правой круговой поляризацией, то процедура нахождения сигнала заключалась только в переходе на другой выходной разъем квадратурного моста при отсутствии сигнала на первом выходе.

Расчёт целеуказаний осуществлялся с помощью программы Heavensat [3], опираясь на параметры орбит НКА, полученных с сайта <http://celestrak.com/>. После уверенного приема сигналов от НКА были проведены пробные измерения по определению поправок наведения в зависимости от азимута и угла места антенны. Антенны устанавливались в упреждающую точку на траектории движения спутника и записывалось прохождение его через ДН антенны; длительность записи составляла 5-10 минут, при этом уверенно прописывались также 2-3 первых боковых лепестка ДН (рис. 9, 10, 11).

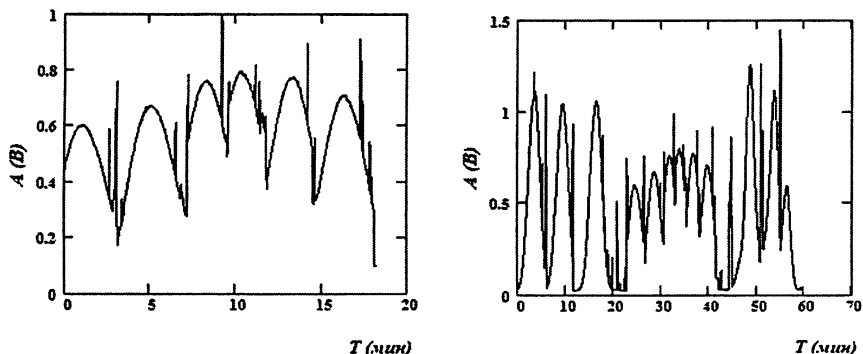


Рис. 9. Примеры записи амплитуды сигнала при измерении разьюстировки антенны по сигналам НКА в диапазоне 1.6 ГГц.

На рис. 9 показаны фрагменты записей последовательного прохождения источника через вершину главного максимума ДН по азимуту при варьировании поправок по углу места в пределах $\pm 30'$ с дискретом $5-10'$. Это процедура определения разъюстировки антенны – отклонения электрической оси зеркала с данным облучателем от геометрической.

По полученным данным на частоте 1.6 ГГц график разъюстировки, в основном, совпал с данными на 327 и 610 МГц, полученными по Солнцу (см. ниже). На рис. 10 показана ДН (главный максимум), измеренная по мощному сигналу НКА. Видна небольшая асимметрия, особенно на уровне ниже 0.3 от максимума, вызванная, по-видимому, изменением скорости движения источника излучения за время наблюдения.

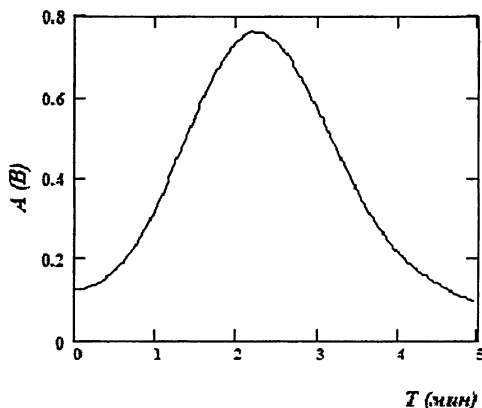


Рис. 10. Наблюдение спутника СРНС GPS ("Навстар" №27663) при прохождении его через главный максимум ДН антенны РТ-14 в Старой Пустыни.

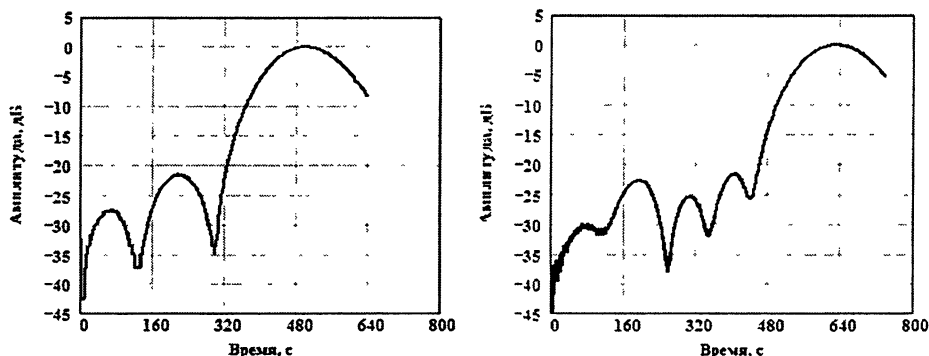


Рис. 11. Диаграммы направленности антенны РТ-14 в разных плоскостях, измеренные по сигналам НКА ГЛОНАСС и GPS

На рис.11 – полные ДН; уровень первых боковых лепестков существенно ниже теоретического уровня -13 дБ, что говорит о недооблучении антенны.

Апробация ИВК детально проводилась на пункте в Старой Пустыни, комплекс в Зименках был запущен оперативно по ее результатам.

В таблицах 1 и 2 приводятся графики двух серий наблюдений НКА ГЛОНАСС и GPS с указанием номеров объектов по международной классификации (С – обозначение спутников СРНС ГЛОНАСС – "Cosmos", N – обозначение спутников СРНС GPS – "Navstar"), горизонтальных и экваториальных координат объекта на дату скана и начальный момент скана.

В первой серии экспериментов, которая проводилась 8 октября 2010 года (табл. 1), входной фильтр был выставлен на среднюю частоту для обеих КНС и не подстраивался под измеряемый сигнал НКА. Как следствие этого была потеря сигналов двух НКА ГЛОНАСС, не попавших в полосу приема. Кроме того, при первых наблюдениях достаточно часто допускалась несинхронность наведения на НКА главными максимумами ДН антенн пунктов.

Во второй серии, осуществленной 26 октября 2010 года (табл. 2), сигналы спутников каждой СРНС принимались отдельно с подстройкой входного фильтра на нужный диапазон частот, наведение проводилось

Таблица 1

Объект	Начало скана время UT	Азимут (N=0°)	Угол места	Прямое восхождение	Склонение
N 35752	11:00	129°41`	22°06`	271°44'02"	-00°58`17"
C 36112	11:15	108°37`	30°03`	288°13'06"	+15°11`38"
N 28474	11:30	62°32`	36°35`	321°48'42"	+44°31`30"
N 23953	11:45	56°13`	29°53`	337°11'46"	+43°01`27"
C 33466	12:00	24°11`	22°10`	23°36'57"	+51°36`55"
N 27663	12:15	315°42`	17°07`	123°51'46"	+38°43`12"
N 34661	12:30	301°42`	38°44`	159°30'44"	+48°25`29"
C 33379	12:45	294°04`	42°01`	172°43'06"	+46°27`12"
C 32395	13:00	267°03`	25°10`	183°17'09"	+19°6`54"
N 26690	13:20	184°00`	18°02`	257°23'57"	-15°43`57"
N 32384	13:35	128°03`	52°46`	297°25'30"	+26°58`27"
C 32276	13:50	111°13`	45°48`	315°43'58"	+27°03`44"
N 22014	14:05	75°45`	22°10`	01°17'19"	+26°07`14"
N 35752	14:20	46°15`	16°52`	35°41'17"	+37°33`31"
C 32393	14:40	329°25`	19°47`	146°04'21"	+47°04`48"

Таблица 2

Объект	Начало скана, время UT	Азимут (N=0°)	Угол места	Прямое восхождение	Склонение
C 32276	06:20	202°59'	50°08'	10°34'12"	+17°59'31"
C 32395	06:40	317°55'	31°28'	04°25'54"	+51°49'03"
C 32275	07:00	47°44'	46°08'	18°08'52"	+59°08'04"
C 33379	07:20	227°03'	29°50'	09°57'03"	+04°48'44"
N 29601	09:30	150°49'	50°30'	16°02'29"	+19°21'44"
N 35752	09:50	126°24'	24°30'	18°14'23"	+02°30'31"
N 23953	10:10	65°22'	31°17'	21°27'46"	+39°01'52"
N 28474	10:30	61°26'	30°44'	22°03'03"	+40°47'41"
N 34661	10:50	308°23'	29°24'	09°08'11"	+45°09'24"
N 29486	11:10	262°36'	19°59'	11°35'21"	+12°30'27"
N 27663	11:30	311°35'	28°03'	09°30'54"	+45°47'22"
N 27704	11:50	231°26'	55°05'	15°03'15"	+28°50'19"
N 24320	12:10	188°20'	21°54'	16°54'38"	-11°37'19"
N 26690	12:30	183°31'	28°05'	17°33'45"	-05°42'45"
C 36400	13:30	129°43'	19°41'	21°52'25"	-03°10'47"
C 36111	13:50	198°30'	34°21'	18°05'40"	+01°52'08"
C 36402	14:10	144°47'	52°00'	20°56'34"	+21°58'44"
C 32277	14:30	317°24'	24°08'	11°54'03"	+45°32'48"
C 33467	14:50	49°22'	51°48'	01°17'00"	+61°16'35"

точно по графику. В каждом из двух сеансов при длительности записи 10-15 минут антенны дважды устанавливались в упреждающую точку на траектории движения спутника на 0-ю и 6-ю минуты и записывалось прохождение его через ДН антенны. Для непрерывности записи использовались два компьютера: при записи сигнала в ОЗУ одного компьютера в течение 30 сек, данные на втором переносились на жесткий диск. Объем информации по всему эксперименту составил более 100 ГБ при тактовой частоте записи 16 МГц (полоса приема 8 МГц).

Результаты измерений (второй серии) сведены в таблицы 3 и 4 для пункта «Старая Пустынь» и в таблицу 5 – для пункта «Зименки». В таблице 3 приводятся скорости движения НКА по азимуту и высоте, уровень выходного сигнала, полуширина ДН и расстояние от НКА до пункта «Старая Пустынь» (отсчет азимута на РТ-14 ведется от юга $S=0^\circ$). В табл. 4 приводятся поправки по азимуту и высоте, полученные по Солнцу и введенные при измерениях, эти же поправки, полученные экспериментально по КА, и их разности. В табл. 5 – данные для пункта Зименки, в том числе измеренные величины разъюстировки для двух осей вращения антенны.

Таблица 3

Объект	Время UI	Азимут, градусы	Угол места, градусы	Уровень, отн. ед.	Дб, з градусы	V ₁ угл. мин/м	V ₂ угл. мин/м	R, км
N 29601	9:31:03	329.5	51	152	0.98	+4.5	-29	21420
N 29601	9:36:09	330	49.5	160	1.05	+5	-31	21565
N 35752	9:49:40	305	25	170	0.92	-18	+22	23219
N 35752	9:55:33	303.5	27	174	0.96	-20	+21	23034
N 23953	10:09:41	244.5	31	84	0.87	-30	+2.5	22519
N 23953	10:15:37	241.5	31	92	0.96	-30	-4	22553
N 28474	10:29:22	240.5	30.5	122	1.04	-2	-25	22708
N 28474	10:35:39	240.5	28	125	1.00	-0.5	-24	22909
N 34661	10:50:44	128.5	30.5	161	0.96	-11	+23	22717
N 34661	10:56:51	127	32.5	167	0.94	-12	+23	22527
N 29486	11:09:15	93	21	132	0.86	-21	-18	23828
N 29486	11:15:54	80.5	19	120	0.86	-21	-18	23996
N 27663	11:31:18	131.5	29	87	0.80	-13	+22	22951
N 27663	11:37:27	130	31	98	0.89	-14	+21	22775
N 27704	11:49:44	52	56.5	125	1.18	+7	+27	21500
N 27704	11:55:39	52.5	59	121	1.06	+6	+27	21367
N 24320	12:09:55	8	23.5	75	1.06	-5	-26	23458
N 24320	12:15:53	7.5	20.5	96	1.01	-5	-26	23727
N 26690	12:29:54	3	29.5	83	0.95	-3	+27	23139
N 26690	12:35:56	3	32	89	1.00	-3	+28	22922
C 36400	13:30:26	308.5	20	51	0.96	+16	-28	22721
C 36400	13:36:53	310.5	17	44	1.05	+16	-27	22987
C 36111	13:49:55	18	36	431	1.20	+8	+33	21239
C 36111	13:55:51	19	39	417	1.06	+8	+33	21049
C 36402	14:10:40	323.5	52	270	0.96	+16	-33	20192
C 36402	14:16:32	325	49	293	1.01	+16	-33	20963
C 33467	14:49:07	228.5	51.5	234	1.25	-6	-32	20259
C 33467	14:55:14	228	49	217	1.01	-2	-33	20411
C 32276	6:19:55	23	51.5	103	1.13	+10	+35	20215
C 32276	6:23:57	24	55	109	1.18	+10	+34	20050
C 32395	6:41:45	133	33	111	1.09	0	+30	21527
C 32395	6:47:11	138	35.5	112	1.16	-1.5	+31	21329
C 32275	7:03:23	227	46	200	0.92	0	+30	20588
C 32275	7:09:23	227	43	210	1.06	+2	+30	20759
C 33379	7:19:52	47	31	219	1.03	+17	+30	21719

Таблица 4

Объект	Время UI	Азимут	Угол места	дА _{изм.} УЛЛ.МАН	дН азим. УЛЛ.МАН	ddd УЛЛ.МАН	DR _{изм.} УЛЛ.МАН	дН азим. УЛЛ.МАН	DD ₂ УЛЛ.МАН	Разность DR-азим. УЛЛ.МАН
K 29601	9:31:3	329° 24'	50° 59'	0	40	40	-0.2	41.6	41.6	1.6
N 29601	9:36:9	329° 46'	49° 34'	0	40	40	-0.8	44.6	44.6	4.6
N 35752	9:49:40	305° 13'	25° 0'	-10	30	31.6	-15.9	37.2	40.5	3.9
K 35752	9:55:33	303° 21'	27° 11'	-20	30	31.6	-19.1	40.1	44.4	12.8
N 23953	10:9:41	244° 23'	31° 0'	-10	20	22.4	-19.6	19.4	27.6	5.2
N 23953	10:15:37	242° 22'	30° 41'	-10	20	22.4	-21.6	19.4	28.4	6.0
N 28474	10:29:22	240° 30'	30° 26'	-10	20	22.4	-11.9	4.2	14.6	-9.8
N 28474	10:35:39	240° 19'	27° 57'	-10	20	22.4	-10	11	14.9	-7.5
N 34661	10:50:44	228° 23'	30° 16'	10	30	31.6	8.1	7	36.3	5.4
K 34661	10:55:51	227° 13'	32° 34'	10	30	31.6	8.1	33.6	34.5	2.9
N 29426	11:9:15	32° 41'	20° 58'	20	30	36.1	4.1	16.4	16.9	-19.2
N 29426	11:15:54	30° 37'	19° 9'	20	30	36.1	17.9	28	33.2	-2.9
K 27663	11:31:29	13° 31'	29° 51'	10	30	31.6	14	23.2	27.1	-4.5
K 27663	11:37:27	130° 8'	31° 1'	10	30	31.6	16.3	20.5	26.5	-5.1
N 27704	11:49:44	52° 42'	56° 20'	30	30	42.4	31.8	37	48.2	6.4
N 27704	11:58:39	52° 22'	59° 1'	30	30	42.4	34.1	39.5	50.9	8.5
K 24320	12:9:55	9° 5'	23° 20'	30	50	58.3	29.6	47.3	56.2	-2.1
K 24320	12:15:53	7° 36'	20° 40'	30	50	58.3	28.4	47	55.1	-2.8
N 26690	12:23:54	3° 11'	29° 30'	30	50	58.3	29.7	52.5	60.4	2.1
K 26690	12:35:56	2° 54'	32° 12'	30	50	58.3	28.8	51.7	59.6	1.3
C 36400	13:30:26	308° 36'	20° 13'	-10	30	31.6	-17.5	42.3	45.9	14.2
C 36400	13:36:53	310° 29'	17° 2'	-20	30	31.6	-8.2	26.2	29	-3.6
C 36111	13:49:55	13° 15'	35° 42'	30	40	50.0	30.7	42.6	52.5	2.5
C 36111	13:55:51	19° 6'	39° 2'	30	40	50.0	31.2	45.1	54.3	4.8
C 36402	14:10:40	323° 18'	52° 10'	-10	30	31.6	-4.7	19	19.5	-12.1
C 36402	14:16:32	324° 56'	48° 51'	-10	30	31.6	-2.7	14.9	15.1	-16.5
C 33467	14:43°	229° 26'	51° 23'	-10	20	22.4	-16.2	-3.4	13.2	-4.0
C 33467	14:53:14	229° 4'	49° 46'	-6	20	22.4	-5.1	27	27.5	6.5
C 32276	6:19:55	22° 41'	51° 33'	30	40	50.0	30.9	43.1	53	3.0
C 32276	6:25:57	23° 41'	55° 2'	30	40	50.0	30.5	41.7	51.7	1.7
C 32395	6:4:45	138° 7'	32° 49'	10	30	31.6	9.8	37.3	38.6	7.0
C 32395	6:47:11	138° 1'	35° 20'	10	30	31.6	10.6	24.4	26.6	-5.0
C 32275	6:59:6	226° 51'	45° 43'	-20	20	22.4	-10.9	-7.7	13.3	-8.9
C 32275	7:5:23	226° 51'	49° 9'	-10	20	22.4	-10.4	32	33.7	11.3
C 33379	7:19:52	47° 6'	31° 2'	30	30	42.4	32.3	33.7	46.7	4.3

Таблица 5

Объект	Время UT	E1	E2	Уровень, отн. ед.	$\Delta\theta_{\text{ср.}}$ градусы	$DE1_{\text{изм.}}$ угл. мин.	$DE2+2_{\text{изм.}}$ угл. мин.	$DD_{\text{ср.}}$ угл. мин.	$R_{\text{ср.}}$ %
N 29601	9:29:40	68° 06'	56° 16'	123	0.85	-6	-8.3	10.3	21410
N 29601	9:35:50	66° 14'	53° 47'	152	0.91	-3.2	-4.2	5.2	21524
N 35752	9:50:25	29° 31'	57° 19'	124	0.87	-3.3	-9.2	12.4	23219
N 35752	9:56:43	31° 44'	59° 56'	104	0.89	5.4	6.5	8.5	22990
N 23953	10:16:35	34° 12'	113° 54'	81	0.97	0.8	10.8	10.9	22506
N 28474	10:30:50	33° 40'	114° 24'	111	0.87	-4.3	1.5	4.6	22637
N 28474	10:36:50	31° 04'	115° 11'	101	0.87	-4.5	1.2	4.6	22833
N 34661	10:55:25	142° 32'	121° 17'	144	0.9	3.3	7.9	11.5	22588
N 29486	11:9:45	159° 51'	83° 03'	135	0.92	4.2	-5	6.6	23872
N 29486	11:15:45	161° 36'	81° 03'	134	0.88	4.5	-5	6.7	24043
N 27663	11:29:45	144° 32'	125° 51'	74	0.85	-4.8	-4.7	6.7	22976
N 27663	11:35:35	142° 42'	123° 54'	88	0.87	-7.5	-8.3	11.2	22900
N 27704	11:56:40	116° 04'	71° 09'	130	0.88	-7.3	5.7	9.3	21321
N 24320	12:15:40	111° 18'	20° 43'	110	0.83	5.7	-8.7	10.4	23754
N 26690	12:30:53	96° 22'	23° 43'	113	0.87	-1.4	3.2	3.4	23153
N 26690	12:36:50	95° 16'	31° 23'	119	0.85	-1.7	4.5	4.8	22935
C 36400	13:29:45	24° 56'	53° 01'	25	0.91	-7.3	-5.5	9.1	22724
C 36400	13:36:5	22° 02'	50° 51'	42	0.85	2.5	1.2	3.1	22992
C 36111	13:50:10	114° 54'	38° 23'	162	0.85	2.8	-5.3	6	21352
C 36111	13:56:35	112° 58'	42° 13'	162	0.83	-6.3	13.3	14.7	21060
C 36402	14:9:32	65° 44'	59° 42'	163	0.84	-7.9	-14.9	16.9	20175
C 36402	14:14:52	64° 17'	57° 10'	202	0.87	-2.4	-4.1	4.2	20333
C 33467	14:50:33	58° 43'	11° 06'	219	0.91	-11.7	9	14.3	20246
C 33467	14:56:35	56° 01'	116° 05'	222	0.87	-12.1	7.5	14.2	20337
C 32276	6:20:15	108° 03'	53° 50'	105	0.86	3.2	-8.5	9.1	20267
C 32276	6:26:40	106° 28'	57° 44'	105	0.86	-4.7	11	11.9	20339
C 32275	7:0:20	54° 35'	117° 47'	199	0.79	10	-5.7	11.5	20540
C 32275	7:6:45	51° 04'	119° 43'	185	0.82	-8	3.3	8.3	20779

Из табл. 3 видно, что скорость перемещения объекта относительно приемных антенн сравнима со скоростью вращения Земли (15 угл.мин/мин), а направления движения КА могут быть любые. Это означает, что суммарная скорость относительного движения аппарата может изменяться в больших пределах. Скорости по отдельным координатам также сильно меняются, начиная с близкой к нулевой. Широкий диапазон векторов скорости дает возможность выбора условий для наилучшего измерения какого-либо параметра антенн и интерферометра в целом.

На рис.12 приведены графики изменения величины разъюстировки антенны РТ-14 (пункт Ст.Пустынь) в зависимости от азимута отдельно для КА двух СРНС. При установке антенны в упреждающую точку учитывалась разъюстировка по двум координатам с учетом угла места антенны, измеренная по Солнцу на частотах 327 и 610 МГц; на графике приводится суммарная величина отклонения электрической оси антенны от геометрической. Средняя величина разъюстировки $\Delta\theta_0$ (РТ-14) получилась

$$\Delta\theta_0 = 0.33' \pm 8.32' \text{ по сигналам НКА ГЛОНАСС и}$$

$$\Delta\theta_0 = 0.59' \pm 7.29' \text{ по сигналам НКА НАВСТАР,}$$

т.е. среднее отклонение близко к нулю, что подтверждает правильность измерений разъюстировки на низких частотах и ее постоянство для всех рабочих частот совмещенного облучателя. Погрешности измерений лежат в пределах точности наведения антенны, определяемой приводными и отсчетными системами ($\pm 5'$ по обеим координатам и соответственно с суммарной погрешностью $\pm (7...10)'$). Тем не менее, есть отдельные отклонения превышающие $10'$, что требует более подробного анализа результатов или проведения дополнительных измерений.

Ширина ДН на уровне половинной мощности $\Delta\theta_{0,5}$ получилась

$$\Delta\theta_{0,5} = 1.04^\circ \pm 0.07^\circ \text{ по сигналам НКА ГЛОНАСС и}$$

$$\Delta\theta_{0,5} = 0.97^\circ \pm 0.07^\circ \text{ по сигналам НКА НАВСТАР}$$

при оценочном расчетном значении 0.9° . Уширение ДН примерно на 10% можно объяснить неоптимальным облучением антенны (недооблучением), что подтверждается низким уровнем боковых лепестков (рис.11). Следствием этого является потеря эффективной площади и усложнение работы по слабым внеземным радиоисточникам.

В отличие от РТ-14 с азимутально-угломестной монтировкой антенна РТ-15 в пункте Зименки имеет устаревшую схему монтировки с осями вращения E_1 и E_2 , связанными с азимутом A и высотой H следующими соотношениями:

$$\text{tg}E_1 = \text{tg}H/\sin A$$

$$\cos E_2 = -\cos H \cdot \cos A$$

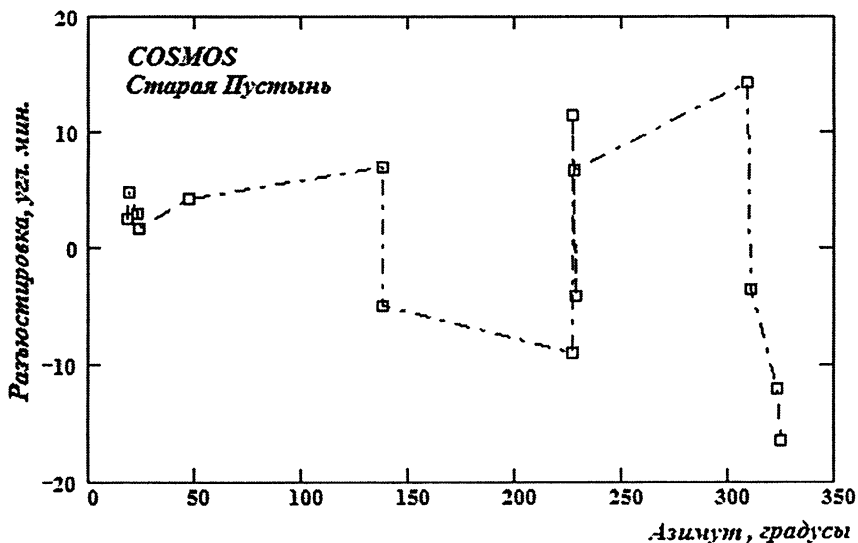
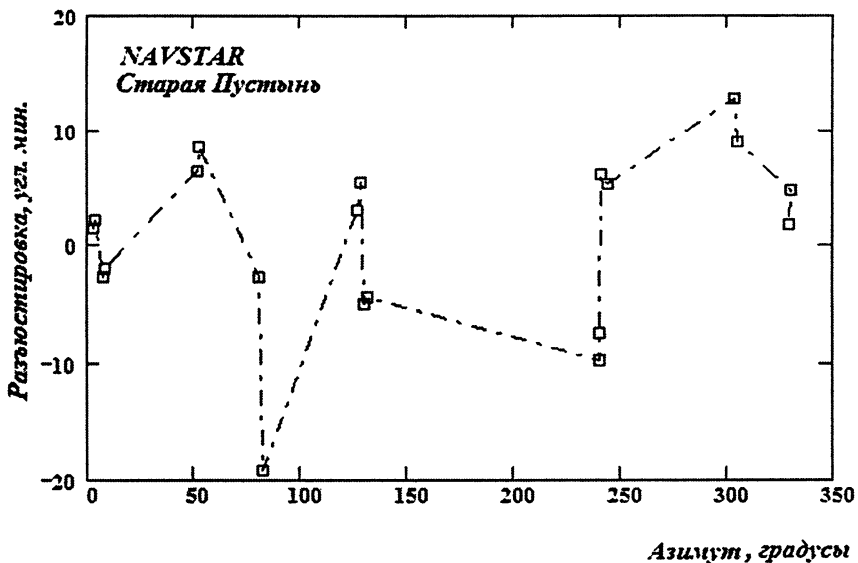


Рис.12. Зависимость разъюстировки антенны РТ-14 в Старой Пустыни от азимута для НКА НАВСТАР (сверху) и ГЛОНАСС (снизу).

На рис.13 приведены графики величины разъюстировки антенны РТ-15 в зависимости от ориентации оси E_2 отдельно для НКЛ двух КНС. При установке антенны в упреждающую точку учитывалась только постоянная поправка 2° по оси E_2 ; на графике приводится суммарная величина отклонения электрической оси антенны от геометрической. Средняя величина разъюстировки $\Delta\theta_0$ (РТ-15) получилась

$$\Delta\theta_0 = 10.41' \pm 4.16' \text{ по сигналам НКА ГЛОНАСС и}$$

$$\Delta\theta_0 = 7.94' \pm 2.86' \text{ по сигналам НКА НАВСТАР,}$$

т.е. среднее отклонение равно примерно $9'$, что указывает на возможность потерь сигнала при проведении измерений из-за неточного наведения на источник. Погрешности измерений лежат в пределах точности наведения антенны для НКА НАВСТАР, определяемой приводными и отсчетными системами ($\pm 1'$ по обеим координатам и с суммарной погрешностью, оцениваемой $\pm (2...3)'$) и несколько завышены для НКА ГЛОНАСС. Также, есть отдельные отклонения более $10'$.

Ширина ДН $\Delta\theta_{0,5}$ (РТ-15) получилась

$$\Delta\theta_{0,5} = 0.85^\circ \pm 0.03^\circ \text{ по сигналам НКА ГЛОНАСС и}$$

$$\Delta\theta_{0,5} = 0.88^\circ \pm 0.03^\circ \text{ по сигналам НКА НАВСТАР}$$

при оценочном расчетном значении 0.84° . Уширения ДН в пределах ошибок измерений практически нет, что указывает на нормальное облучение антенны, однако уровень боковых лепестков также низкий.

На рис. 14 показаны амплитуды выходных сигналов от аппаратов КНС, нормированные к максимальной амплитуде в серии измерений. Величина сигналов от НКА НАВСТАР меняется не более, чем в 2 раза, от НКА ГЛОНАСС – более, чем в 5 раз. Это обстоятельство можно объяснить тем, что НКА ГЛОНАСС работают на разной центральной частоте, а во время измерений частота второго гетеродина приемных устройств не изменялась и соответствовала рабочей частоте 1601 МГц; поэтому на величину сигналов оказывала влияние неравномерность АЧХ приемников ($2..3$ дБ). По техническим характеристикам СРНС уровень сигнала НКА может меняться в пределах 2 дБ в зависимости от высоты над горизонтом. Из-за изменения расстояния до аппаратов спад сигналов не должен превышать 30% , и при анализе не обнаружено явной зависимости амплитуды принимаемых сигналов от изменения расстояния до НКА. Т.о. основной причиной больших колебаний амплитуды можно считать неточное наведение антенны на источник излучения. По-видимому, необходимо также проанализировать величины поправок к координатам НКА при обновлении данных альманаха и периодичность обновления

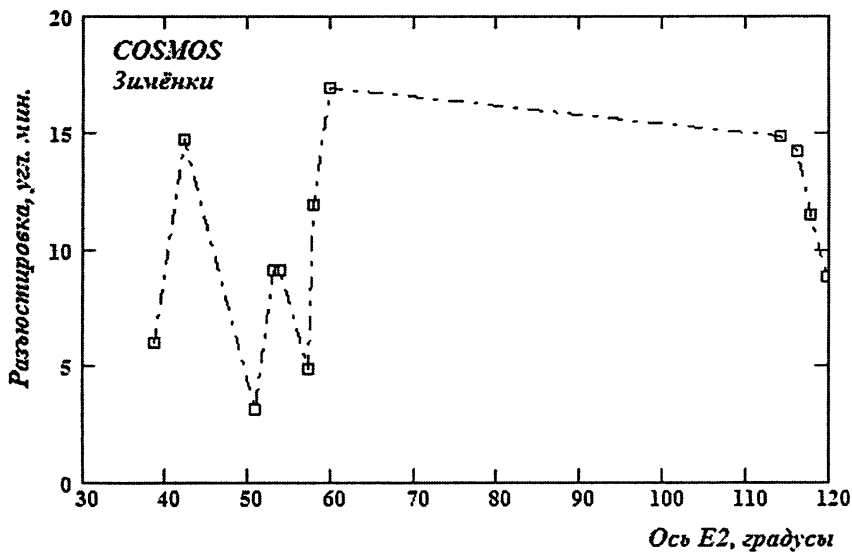
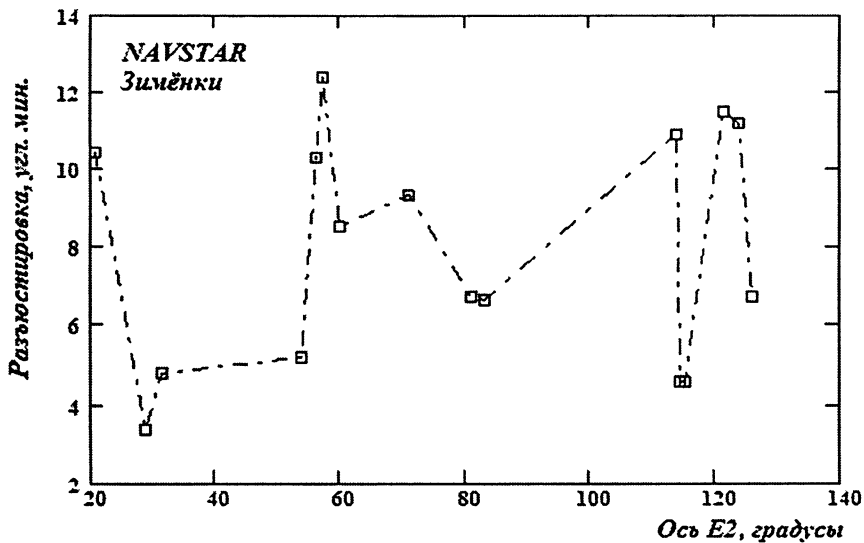


Рис.13. Зависимость разъюстировки антенны РТ-15 в Зимёнках от ориентации оси E2 для НКА НАВСТАР (сверху) и ГЛОНАСС (снизу).

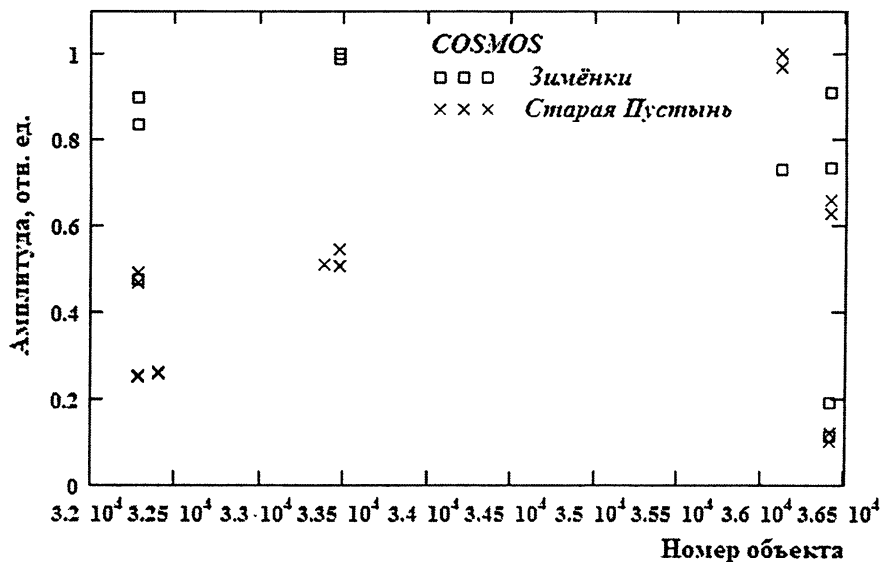
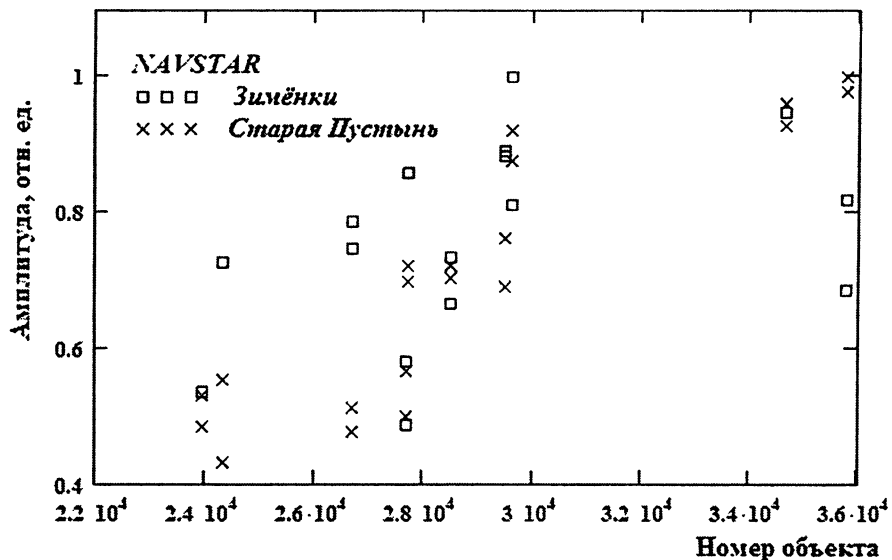


Рис.14. Амплитуда выходных сигналов от НКА НАВСТАР (сверху) и НКА ГЛОНАСС (снизу)

3. Результаты калибровки интерферометра

Корреляционная обработка данных проводится на модернизированном корреляторе НИРФИ. Ко времени публикации работы получены корреляционные отклики по нескольким объектам, которые имеют особенности, обусловленные характером излучаемых искусственных квазишумовых сигналов НКА (данный вопрос будет рассмотрен в отдельной работе).

На первом этапе корреляционной обработки определены задержки сигналов на базе 70 км для 12 аппаратов по результатам сессии 26 октября 2010 года. В табл.6 приведены величины задержек, измеренных и рассчитанных по параметрам орбит НКА, и их разность.

Из полученных данных следует, что есть постоянный временной сдвиг около 17.3 мкс (среднее значение), обусловленный инструментальной задержкой – рассинхронизацией временной привязки, а также разностью времен распространения сигналов в приемных трактах, которую необходимо учитывать при прецизионных измерениях. Длина трактов в пункте Старая Пустынь достигает 200 м, в Зименках – порядка 60 м, разность времен распространения сигналов около 0.5 мкс, т.е. в нашем случае основной вклад вносит неточность привязки времени на пунктах. Зафиксированная в протоколах измерений разность времени (стандартов) на обоих пунктах с временем GPS составила примерно +8 мкс, т.е. суммарная ошибка должна была быть близка к нулю. Из результатов измерений ясно, что в одном из пунктов имеет место приводящий к ошибке в знаке поправки аппаратурный дефект, который следует выявить и учитывать в дальнейшей работе.

Таблица 6

Объект	Время UT	Задержка τ , мкс	Расч.задержка τ , мкс	Разность, мкс
N 23953	10:10:00	+190.31	+172.92	17.39
N 26690	12:30:00	-152.50	- 169.83	17.33
N 27663	11:30:00	+ 35.38	+19.33	16.05
N 28474	10:30:00	+197.31	+179.73	17.58
N 29486	11:10:00	-132.75	- 146.82	14.07
N 29601	9:30:00	-41.69	- 59.92	18.23
N 34661	10:50:00	+23.44	+6.60	16.84
N 35752	9:50:00	+18.63	+0.21	18.42
C 33467	14:50:00	+157.88	+139.66	18.22
C 36402	14:10:00	-25.88	- 44.53	18.65
C 36400	13:30:00	+6.06	- 10 43	16.49
C 36111	13:51:00	-161.75	- 179.50	17.75

Результаты данного эксперимента показывают эффективность калибровки приемного комплекса РСДБ по мощным сигналам КА. Измерение проекций базы по сигналам КА на околоземных орбитах требует изменения алгоритма расчета задержки от КА относительно антенн интерферометра. По имеющимся алгоритмам удалось только оценить величину проекций базы с погрешностью в несколько десятков метров, общая же величина базы отличалась от расчетной всего на несколько метров. В дальнейшем планируется отработать алгоритм расчета задержки сигналов КА для точного решения задачи калибровки инструмента и обратной задачи – высокоточного определения положения КА по данным РСДБ измерений.

Заключение

Выполненные эксперименты и полученные результаты показали эффективность юстировки антенн и измерения параметров радиоинтерферометров с независимым приемом, в том числе аппаратурных характеристик, по сигналам КА на высоких околоземных орбитах.

Исходя из результатов первых экспериментов, определены этапы развития и повышения эффективности прикладных и научных исследований на РСДБ НИРФИ:

- совершенствование приемной и регистрирующей аппаратуры при расширении полосы приема, надежности работы, оперативности контроля параметров перед сеансом наблюдений, оперативной связи пунктов во время сеансов для непосредственной корреляционной обработки контрольных записей;

- совершенствование методов и методик калибровки антенн и радиоинтерферометров по сигналам околоземных КА с целью повышения точности и оперативности измерений;

- разработка алгоритмов высокоточного определения положения КА по квазишумовым сигналам, отработка методик и проведение натурных экспериментов;

- расширение имеющегося двухэлементного радиоинтерферометра до многоэлементного комплекса, состоящего из трех-четырёх приемных РСДБ-пунктов и включающего крупные радиотелескопы (РТ-64 Калязин, РТ-70 Евпатория), работающие в частотном диапазоне СРНС ГЛОНАСС.

Литература

1. 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 приемом для солнечных исследований. Приемный комплекс // Препринт № 523 – Нижний Новгород: ФГНУ НИРФИ. 2008 – 28с.
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. Лапшин Александр. Heavensat 2.3.0a. <http://www.heavensat.ru/>