

Министерство высшего и среднего специального образования РСФСР

Горьковский ордена Трудового Красного Знамени
научно-исследовательский радиофизический институт (НИРФИ)

П р е п р и н т № 206

РАДИОАСТРОМЕТРИЧЕСКИЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР НИРФИ

В.А.Алексеев
А.А.Антиленко
Э.Д.Гатэлжк
А.Ф.Дементьев
Н.А.Князев
А.Е.Крюков
Б.Н.Липатов
Р.Н.Рат
А.С.Сизов

Горький 1986

УДК 621.396.628:523.164

Создан экспериментальный двухдиапазонный радиоастрометрический интерферометр со сверхдлинной базой (РСДБ) с многоканальным синтезом эффективной полосы частот приемаемого излучения $\Delta f_{\text{эфф}} \approx 50$ МГц, что обеспечивает точность измерения групповой задержки интерферирующих сигналов не хуже ~ 1 нс (30 см длины). Радиоинтерферометр предназначен для решения задач астрометрии, геодезии, геодинамики и астрофизических исследований.

Приём и регистрация сигналов ведётся в сантиметровом и дециметровом диапазонах волн, что позволяет учесть влияние ионосфера Земли на задержку и частоту интерференции и повысить точность астрометрических измерений. Обработка записанной информации происходит в масштабе времени, близком к реальному.

С помощью созданного аппаратурного комплекса в 1979–1985 гг. проведены радиоинтерферометрические эксперименты на базах длиной 150 м, 4 км и 1200 км.

Чувствительность комплекса при $T = 100$ составляет $\sim 0,1$ Ян. В первых экспериментах по ряду квазаров получена точность единичного измерения задержки $\sim 0,7$ нс, что соответствует номинальной разрешающей способности по синтезированной диаграмме направленности интерферометра на 1000-километровой базе $\sim 2 \cdot 10^{-7}$ рад. С использованием указанного РСДБ НИРФИ были успешно проведены интерферционные наблюдения АМС "Венера-15" и "Вега-2".

ВВЕДЕНИЕ

Середина 70-х – начало 80-х годов нашего столетия явились годами становления в астрометрии нового направления – радиоастрометрии, основными инструментами которой являются радиointерферометры со сверхдлинными базами (РСДБ).

Первичной информативной основой для решения астрометрических задач с применением РСДБ являются измеряемые в процессе интерферометрической обработки взаимная задержка $\tau(t)$ сигналов космического радиоисточника, принятых в разнесённых пунктах, и частота интерференции $F(t)$, определяемая скоростью изменения задержки $\tau(t)$, отнесённой к частоте приёма f_0 : $F(t) = f_0 \frac{d\tau(t)}{dt}$. Величина $\tau(t)$ содержит в себе геометрическую задержку $\tau_r(t)$ плюс разности времён распространения излучения от источника до разнесённых антенн интерферометра, меняющуюся вследствие вращения Земли, и рассинхронизацию шкал времени $\Delta t_w(\tau)$, в которых сигналы принимаемого излучения фиксируются

$$\tau(t) = \tau_r(t) + \Delta t_w(\tau), \quad \text{где} \quad (\text{B.1.})$$

$\tau_r(t) = (\vec{b} \vec{s})_t \frac{1}{c}, \quad \vec{b} - \text{вектор базовой линии интерферометра, } \vec{s} - \text{единичный вектор в направлении на наблюдаемый источник, } c - \text{скорость распространения волн, и}$

$$F(t) = \frac{f_0}{c} ([\vec{\Omega} \vec{b}] \vec{s})_t + f_0 \frac{d}{dt} (\Delta t_w, t), \quad (\text{B.2.})$$

где $\vec{\Omega}$ – вектор вращения базы.

Определение векторов \vec{s}_i составляет собственно предмет астрометрии; определение длины и ориентации вектора \vec{b} в системе наблюдаемых источников позволяет определить расстояние между пунктами наблюдений и параметры вращения земной хорды, закреплённой ими, а определение величин $\Delta t_w(\tau)$ и $d(\Delta t_w, t)/dt$ решает задачу задания единого времени для этих пунктов. Возможны как частные решения, так и комплексное решение по определению всех величин, входящих в функции

(B.1) и (B.2). Методы решения требуют наблюдения той или иной группы радиоисточников на различных часовых углах /1,2/. При этом номинальная разрешающая способность радиointерферометра по данным измерения задержки будет: в угловой мере $\delta\theta = \frac{C(OSW)}{\Delta f} \text{ рад}$ и в линейной мере $\delta L = C(OSW)^{-1}/\Delta f$.

Здесь соотношение $1/\delta\Delta f$ определяет ширину корреляционной сглаживющей диаграммы направленности интерферометра с полосой частот приёма Δf , OSW - отношение сигнала к шуму в выходном отклике интерферометра.

Высокую направленность интерферометра можно получить и при ограниченном быстродействии используемых в нём систем регистрации принимаемых сигналов, используя для этого принципы, подобные апертурному синтезу, но только заполняя требуемую область пространства частот не путём перемещения малой антенны в плоскость синтезируемой апертуры, а перестраивая по определённому закону частоту приёма в необходимой полосе частот. Основное условие при этом - сохранение взаимных фазовых соотношений интерферируемых сигналов во всей синтезируемой полосе частот, чтобы обеспечить последующий синтез широкополосного отклика интерферометра из парциальных узкополосных откликов.

Начальная неопределённость в координатах источника, параметрах базы интерферометра, ошибки синхронизации шкал времени и их различие приводят к соответствующей неопределенности положения максимума интерференционного отклика в двумерной области "задержка - частота интерференции". Поэтому первичная обработка данных радиointерферометрических наблюдений должна содержать две процедуры:

- получение оценок кросскорреляционной функции интерферируемых сигналов в интервале априорной неопределенности их базисной задержки, и
- проведение спектрального анализа для каждого временного сдвига в области априорной неопределенности частоты интерференции. При этом должны учитываться эффекты, вызванные вращением Земли, которое приводит к немногому изменению взаимной задержки интерферируемых сигналов и частоты интерференции.

При определении оптимальной длины волны радиоастрометрического РСДБ следует учитывать частотные зависимости: скорости распространения электромагнитного излучения Земли, поглощения излучения в атмосфере Земли, фонового излучения, интенсивности излучения компактных радиоисточников, пригодных для радиоастрометрических приложений.

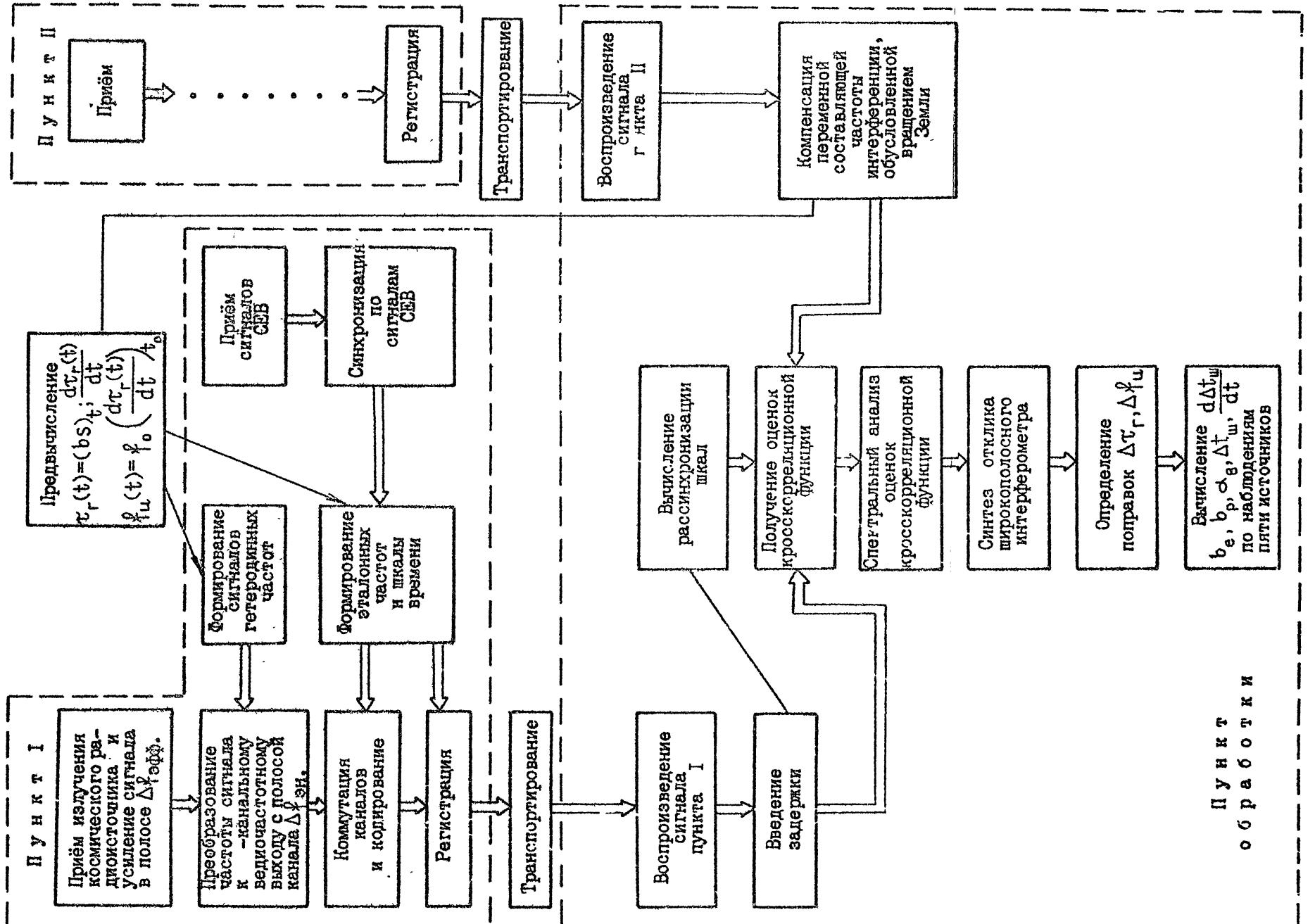


Рис. 1.1. Блок-схема алгоритма радиосонос-реконфигурируемой пространственно-временной привязки разнесенных пунктов

Атмосфера Земли имеет нейтральную компоненту - тропосферу, электрическая толщина которой не зависит от частоты и имеет среднюю длину $\sim 2,5$ м в зенитном направлении с дисперсией её оценки ~ 10 см по измерениям приземных значений температуры, давления и влажности /3/ и с дисперсией $\sim 1-3$ см при дополнительных измерениях радиояркостной температуры атмосферы в линии излучения водяного пара /4/.

Ионизированная компонента атмосферы - ионосфера - имеет частотно-зависимую электрическую толщину $L_{\text{ш},f} \sim b/f^2$ и для среднего состояния ионосферы оценивается величиной $L_{\text{ш}} \approx 10^9$ м для $f = 10^9$ Гц и $L_{\text{ш}} = 0,1$ м для $f = 10^{10}$ Гц в зенитном направлении, с дисперсией оценки $\sim 10\% L_{\text{ш}}$.

Атмосферное поглощение становится существенным на частотах $f > 10^{10}$ Гц из-за потери излучения на возбуждение молекул водяного пара и кислорода.

Фоновое излучение создаётся распределённым космическим и атмосферным излучениями и имеет минимум в диапазоне частот $10^9 + 10^{10}$ Гц. Для определения области максимального излучения группы источников, наблюдение которых необходимо для решения астрометрических задач, проведён анализ спектров излучения кандидатов в эту группу источников /5/, который показал, что наибольшая интенсивность их радиоизлучения сосредоточена в диапазоне $3 + 6$ см. Этот диапазон удовлетворяет также условиям минимального поглощения радиоизлучения в атмосфере Земли - минимального фонового излучения. Неучитываемый набег пути излучения в ионосфере Земли оценивается здесь величиной ~ 5 см и приемлем для реализации наносекундной точности измерения взаимной задержки интерферируемых сигналов. Для достижения субнаносекундных точностей необходимы прямые измерения электрической толщины ионосферы методом двухчастотных измерений с выбором второй длины волны в диапазоне $\lambda \geq 10$ см.

Исходя из этих соображений, нами выбрана схема двухчастотного интерферометра с $\lambda_1 \approx 5$ см и $\lambda_2 \approx 30$ см. Соответствующая блок-схема алгоритма решения астрометрических задач с применением РСДБ приведена на рис. I.

I. ПРИЁМНЫЙ КОМПЛЕКС РАДИОИНТЕРФЕРСМЕТРА

I.I. Приёмная система и система когерентного преобразования сигналов диапазона $\lambda \approx 5$ см

Основу приёмной системы сантиметрового диапазона составляют неоклахдаемые параметрические усилители. Температура собственных шумов усилителей $\sim 130 + 150$ К, ширина полосы усиливаемых частот ~ 250 МГц, коэффициент усиления $20 + 25$ дБ. В каждом приёмном пункте используется два последовательно включённых усилительных блока, что обеспечивает надёжное подавление влияния собственных шумов систем когерентного преобразования частоты на общую шумовую температуру системы. Для обеспечения радиометрического модуляционного режима измерений на входе первого каскада усиления установлен блок модулятора, прямые потери которого не превышают $0,15 + 0,2$ дБ. В блок модулятора встроен калиброванный генератор шума для обеспечения калибровки радиометрических измерений.

Разработанная и изготовленная нами система когерентного преобразования сигнала представляет собой систему с двойным преобразованием частоты, реализующую полосу частот приёма 50 МГц и преобразующую принимаемые сигналы сантиметрового диапазона в рабочую полосу устройства синтеза широкой полосы частот (СШПЧ) 30–76 МГц. Блок-схема системы показана на рис. I.2. Сигнал первого, фиксированного по частоте гетеродина формируется непосредственно из сигнала 5 МГц рубидиевого стандарта частоты ЧI-69 путём умножения, сигнал второго гетеродина получается умножением выходного сигнала синтезатора частоты ЧБ-58, который синхронизируется сигналом того же стандарта частоты. Значение частоты сигнала второго гетеродина устанавливается с помощью синтезатора частоты с учётом предварительно рассчитанной величины дифференциального допплеровского сдвига частоты на начальный момент каждого РСДБ-сеанса наблюдений космического радиоисточника.

На рис. I.3 показана блок-схема формирования сигнала первого гетеродина, построенного на принципе умножения частоты выходного сигнала рубидиевого стандарта частоты, что позволило создать простую и надёжную в работе конструкцию гетеродина сантиметрового диапазона длин волн, давшего сигнал достаточной мощности и хорошей спектральной чистоты. Части схемы, обведённые пунктиром, выполнены в виде модулей, а весь гетеродин собран в отдельном блоке. Сигнал частоты

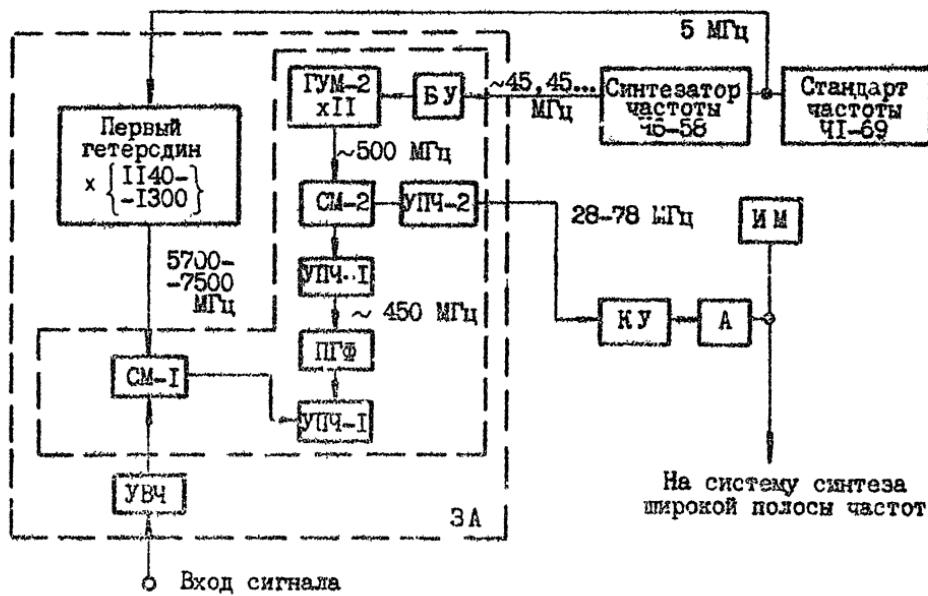


Рис. 1.2. Структурная схема системы когерентного преобразования сигнала $\lambda = 5$ см.

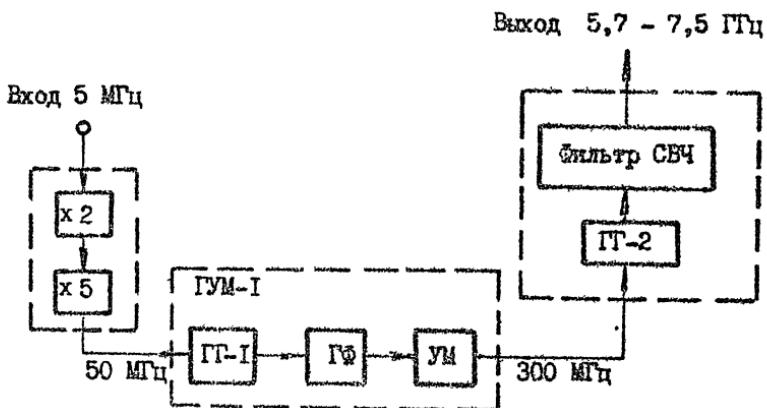


Рис. 1.3. Структурная схема первого гетеродина $\lambda = 5$ см

5 МГц с выхода рубидиевого стандарта ЧИ-69 поступает на вход двухступенчатого транзисторного умножителя частоты на 10. Вначале сигнал умножается по частоте на 2, а потом - на 5. Сигнал частоты 50 МГц умножается затем на 6 с помощью гетеродинного умножительного модуля ГУМ-1, который состоит из генератора гармоник ГГ-1, гребенчатого фильтра ГФ и транзисторного усилителя мощности УМ. Генератор гармоник выполнен на диоде с накоплением заряда (ДНЗ), обеспечивающим получение гармоник исходного сигнала в полосе частот до 1 ГГц. Сигнал генератора гармоник поступает на перестраиваемый гребенчатый фильтр ГФ, настроенный на шестую гармонику и выделяющий сигнал частоты 300 МГц. Этот сигнал затем усиливается и поступает на второй генератор гармоник ГГ-2, позволяющий формировать в режиме ДНЗ из синусоидального сигнала последовательность импульсов, длительностью 0,1 мс с частотой следования в данном случае 300 МГц. Выход генератора гармоник нагружен на узкополосный фильтр на встречных стержнях, конструкция которого позволяет проводить перестройку по частоте и настраиваться на гармоники сигнала 300 МГц, начиная с 13 по 25, открывая тем самым частотный диапазон 5,7 - 7,5 ГГц.

При таком способе формирования гетеродинного сигнала на каждом шаге умножения частоты происходит качественное подавление ненужных гармоник, причём, особо тщательное подавление осуществляется на самых первых этапах умножения при формировании сигнала 50 МГц. Этому, кроме схемных решений, в значительной степени способствует выбор самого ряда коэффициентов умножения: 2,5,6,19+25. В выходном гетеродинном сигнале уровень мешающих спектральных составляющих, связанных с гармониками сигнала 300 МГц, около номинальной частоты не превышает -40 дБ, а всех остальных, включая и спектральные составляющие, обусловленные гармониками сигнала 5 МГц, пренебрежимо мал, и они не оказывают влияния на работу РСДБ-системы. Выходная мощность гетеродинного сигнала равна ~0,3 милливатт, что достаточно для нормальной работы специально разработанного СВЧ-смесителя СМ-1. Это балансный смеситель с двухшлейфным мостом на входе на диодах с барьером Шотки типа AA 112, на которые подается внешнее смещение, позволяющее оптимально выбирать рабочую точку для данного уровня мощности гетеродинного сигнала. Потери преобразования смесителя ~7 дБ. При соответствующей настройке смеситель нормально работает в диапазоне частот от 5,2 до 7,6 ГГц.

С выхода смесителя сигнал поступает на вход широкополосного тран-

зисторного усилителя и на гребенчатый фильтр ПЧ, задающий рабочую полосу частот приёма 50 МГц. Средняя частота сигнала первой промежуточной частоты составляет 450 МГц.

Сигнал первой промежуточной частоты подаётся на второй смеситель СМ-2 и, с помощью сигнала второго гетеродина, преобразуется на вторую промежуточную частоту. Сигнал второго гетеродина, перестраиваемый по частоте в районе 500 МГц, образован с помощью гетеродинного умножительного модуля ГУМ-2 из выходного сигнала синтезатора частоты 46-58 45,454545 МГц, прошедшего через узкополосный буферный транзисторный усилитель БУ. Гребенчатый фильтр в ГУМ-2 настроен на одиннадцатую гармонику сигнала 45,454545 МГц и выделяет сигнал нужной частоты 500 МГц, который поступает на второй смеситель. Сигнал второй промежуточной частоты в полосе частот 28-78 МГц усиливается в широкополосном усилителе УПЧ-2.

Аппаратура А, отмеченная на рис. I.2 пунктиром, располагается непосредственно в зеркале антенны и соединяется с выходной частью приёмной системы достаточно длинным кабелем, на выходе которого с помощью корректирующего усилителя КУ осуществляется устранение искажений в сигнале, связанных с большим затуханием на верхних частотах рабочей полосы. Далее сигнал через переключаемый аттенюатор А поступает на измеритель мощности ИМ принятого сигнала от радиоисточника и одновременно подаётся на систему синтеза широкой эффективной полосы частот СШПЧ.

Отметим, что применение всех этих схемных решений позволяет перестраивать систему когерентного преобразования на приём сигналов любой частоты в диапазоне 5,2 - 7,6 ГГц.

На рис. I.4 приведён вид спектра выходного интерференционного колебания, который определяется двумя системами когерентного преобразования сигналов сантиметрового диапазона. Частотное разрешение Фурье-анализа составляет 0,01 Гц. Измерение проведено по схеме, полностью повторяющей структуру радиointерферометра. На сигнальные входы двух приёмных систем был подан достаточно мощный шумовой сигнал для обеспечения хорошего отношения сигнал/шум на выходе системы с целью установления формы спектральной линии интерференционного колебания. После всех частотных преобразований в приёмных системах выходные видеосигналы с каждого плеча радиointерферометра перемежались, и результат подвергался спектральному анализу на низкочастотном анализаторе спектра С4-54. На синтезаторах частоты 46-58 была введена от-

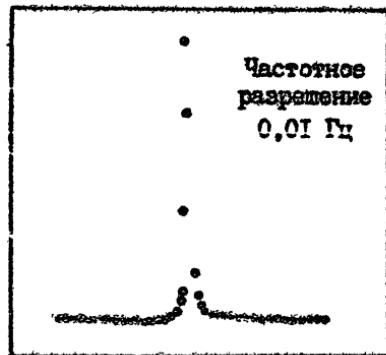


Рис. 1.4. Контроль когерентности преобразования сигналов $\lambda = 5$ см

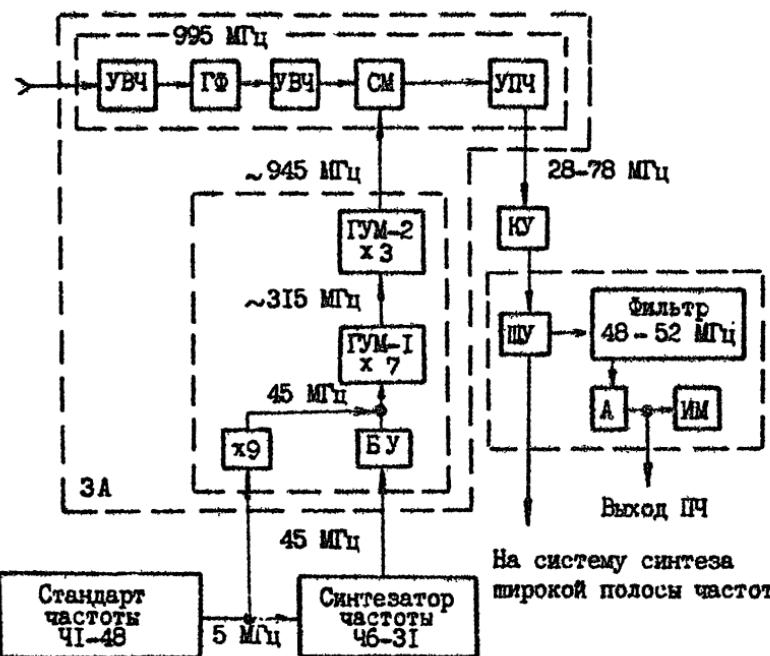


Рис. 1.5. Структурная схема системы когерентного преобразования $\lambda = 32$ см

носительная частотная расстройка, соответствующая смещению по частоте спектральной линии интерференционного колебания на ~ 1 Гц от нулевой частоты.

Проверка двух систем когерентного преобразования сигналов по схеме радиоинтерферометра показала, что линия спектра интерференционного колебания, обусловленная умножительными каскадами гетеродинов, чистая, а её амплитуда соответствует энергетике входного шумового сигнала. Это свидетельствует о том, что система когерентного преобразования сигналов сантиметрового диапазона не вносит существенных искажений при временах когерентного накопления до 100 с – максимальном времени, использовавшемся при проверке.

Наши проверки показали также, что сами рубидиевые стандарты частоты ЧИ-69 при работе в составе астрометрического РСДБ в диапазоне $\lambda \approx 5$ см позволяют проводить когерентное накопление до 50 с практически без искажения формы линии интерференционного колебания при условии незначительной переделки в них, заключающейся в увеличении примерно до 40 с постоянной времени в цепи обратной связи фазовой автоподстройки частоты, осуществляющей управление частотой кварцевого генератора относительно спорной линии рубидиевого перехода.

I.2. Приёмная система и система когерентного преобразования сигналов диапазона $\lambda = 32$ см

Блок схема приёмной системы с системой когерентного преобразования частоты принимаемых сигналов диапазона 32 см приведена на рис. I.5. В качестве входного усилителя высокой частоты используется транзисторный усилитель с температурой шума 160 ± 170 К и коэффициентом усиления ~ 30 дБ. Усилитель вместе с модулятором и калибровочным шумовым генератором заключён в отдельный модуль, который с помощью коаксиального соединения крепится к облучателю антенны. Потери в открытом состоянии модулятора не превышают 0,2 дБ. Полоса частот приёма ~ 50 МГц, в которой осуществляется восемьмиканальный синтез эффективной полосы частот, формируется с помощью полосового гребенчатого фильтра ПГФ полоскового типа, включённого в приемный тракт после входного усилителя.

Система когерентного преобразования выполнена по схеме с одним преобразованием частоты и разработана на основе рубидиевого стандарта частоты ЧИ-69 (ЧИ-48) и синтезатора частоты ЧБ-31 (ЧБ-58). Из вы-

ходного сигнала синтезатора частоты, синхронизованным сигналом 5 МГц рубидиевого стандарта, непосредственно путём прямого умножения формируется гетеродинный сигнал, перестраивающийся в небольших пределах по частоте в целях компенсации дифференциального дошперовского сдвига частоты между призмаами на разных пучках радиоинтерферометра сигналами радиоисточника. Выходной сигнал синтезатора ~ 45 МГц, предварительно прошедший через узкополосный буферный усилитель БУ, с помощью гетеродинных умножительных модулей ГУМ-1 и ГУМ-2, содержащих генераторы гармоник на основе диодов с накоплением заряда и полосковые перестраиваемые гребенчатые фильтры, умножается до частоты 945 МГц в два этапа. На обоих этапах умножения осуществляется эффективное подавление в выходном сигнале ненужных спектральных составляющих, связанных с гармониками сигнала 45 МГц. Конструкция гетеродинных модулей допускает перестройку гетеродинного сигнала в пределах 750 + 1050 МГц. Сформированный таким путём гетеродинный сигнал поступает на смеситель СМ.

Сигнал промежуточной частоты в интервале 28 + 78 МГц по кабелю, соединяющему зеркальную кабину и аппаратную комнату, подаётся на вход корректирующего усилителя КУ, устраняющего искажения сигнала, а затем через аттенюатор поступает в восьмиканальный блок синтеза широкой полосы частот СШПЧ.

В радиометрическом режиме работы РСДБ-приёмника на $\lambda = 32$ см измерение полной принимаемой мощности излучения радиоисточника может вестись как во всей рабочей полосе частот 50 МГц, так и в полосе 4 МГц, сформированной в диапазоне промежуточной частоты в интервале 46 - 50 МГц с помощью полосового фильтра. Сигналы на измеритель мощности ИМ поступают через переключаемые аттенюаторы A_1 и A_2 . В радиометрическом режиме используются как модуляционный, так и компенсационный приём.

1.3. Система синтеза широкой полосы частот (I-й этап)

Нами разработано многоканальное устройство для синтеза широкой эффективной полосы частот, преобразующее информативные сигналы из тракта промежуточной частоты систем когерентного преобразования астрометрического РСДБ НИРФИ на видеочастоту с сохранением фазовых соотношений между сигналами из каждого канала. Число каналов равно восьми с законочным распределением их по частоте, рассмотренным в /6/. Величина ми-

нимального разноса частот у двух соседних каналов - 2 МГц, что определило выбор частотных каналов с разносом на 2, 8, 20, 32, 36, 42 и 46 МГц относительно начальной частоты. Такая схема обладает небольшой избыточностью: здесь дважды повторяются разностные частоты 4, 6, 10, 12 и 34 МГц. Квадрат модуля фильтрующей функции для такого распределения каналов, характеризующий "направленность" радиоинтерферометра по задержке τ , показан на рис. I.6. Разнос между соседними главными максимумами фильтрующей функции в 0,5 нс выбран с таким учётом, чтобы основной максимум при $\tau = 0$ надёжно выявлялся огибающей одноканальной корреляционной функции с шириной, определяемой энергетической полосой частот записи на магнитофон $\Delta f_{\text{эн}} = 500$ кГц. Основной лепесток фильтрующей функции имеет ширину 21 нс на уровне -3 дБ.

Блок-схема устройства синтеза широкой полосы частот (СШЧ) изображена на рис. I.7. Устройство содержит восемь одинаковых каналов, действующих параллельно, а запись на магнитофон осуществляется их последовательным подключением. Информативный сигнал в полосе частот 30 ± 76 МГц поступает из тракта промежуточной частоты системы когерентного преобразования сигналов радиоинтерферометра на восемь одинаковых смесителей СИ, на вторые входы которых подаются сигналы специально сформированной сетки гетеродинных сигналов. В качестве опорного сигнала, из которого образуются гетеродинные сигналы, служит сигнал 1 МГц рубидиевого стандарта частоты. Этот сигнал удваивается по частоте с помощью транзисторного умножителя и поступает на восемь перестраиваемых фазовращателей, а затем сигналы 2 МГц поступают на генераторы гармоник ГГ, выполненные на диодах с накоплением заряда типа ГА 401. Генераторы гармоник вырабатывают короткие импульсы, синхронизированные входным сигналом 2 МГц. Эти периодические импульсные сигналы подаются на узкополосные резонансные фильтры, настроенные на частоты 30, 32, 38, 50, 62, 66, 72 и 76 МГц.

Такой принцип построения гетеродинов, использующий регулировку фазы в относительно низкочастотных исходных сигналах, позволяет проводить её перестройку в гетеродинных сигналах в очень широких пределах ($\gtrsim 2\pi$) при незначительных изменениях амплитуды. С выходов фильтров сформированные гетеродинные сигналы поступают на смесители. Преобразованные в смесителях на видеочастоту информативные сигналы проходят через фильтры низкой частоты ФНЧ с полосой пропускания 0 - 500 кГц, усиливаются и через диодные ключи Кл1 и Кл2 подаются на

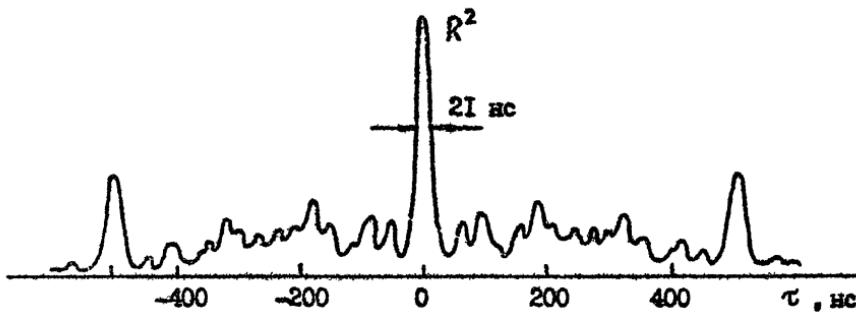


Рис. 1.6. Фильтрующая функция
импульсоголосового интерферометра по задержке

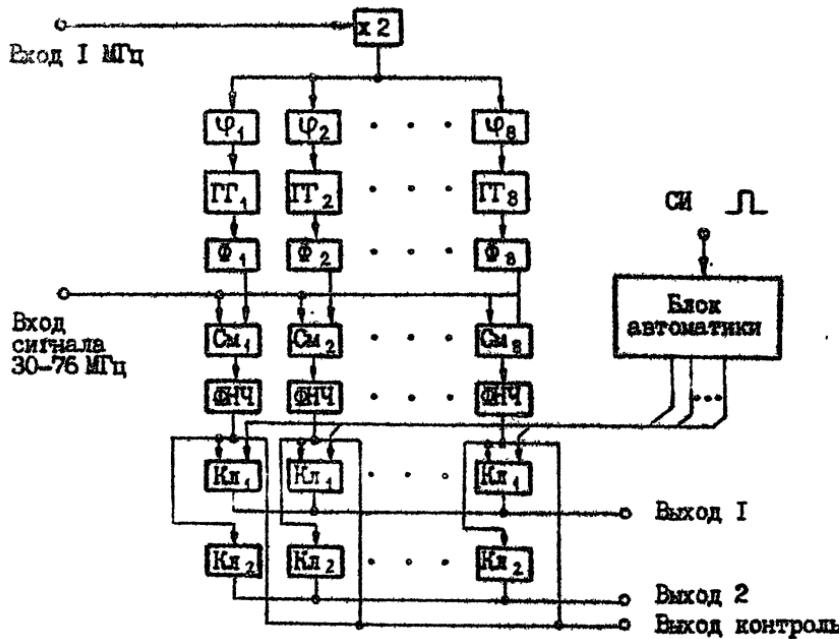


Рис. 1.7. Структурная схема
устройства синтеза широкой полосы частот

один из двух имеющихся выходов, предназначенных для подключения к двум магнитофонам. Управление ключами Кл1 может происходить как от переключателя, так и программно, с помощью блока автоматики СА. На вход этой схемы поступают синхронизированные местной шкалой времени импульсы от системы кодирования и регистрации информации, частота повторения которых (2 Гц или 0,166 Гц) определяет частоту последовательного подключения каналов синтеза для записи на один из магнитофонов. Управление ключами Кл2 осуществляется вручную, поэтому на втором выходе системы синтеза постоянно присутствует сигнал любого из каналов синтеза.

В системе синтеза предусмотрена возможность автономной фазовой калибровки частотных каналов, выполняемой независимо в каждом приёмном пункте перед проведением цикла наблюдения радиоисточников.

I.4. Система кодирования и регистрация информации

Система предназначена для амплитудного и временного кодирования сигналов, поступающих с выходов системы синтеза широкой полосы, и записи их в цифровом виде на накопителях на магнитной ленте (НМЛ) типа ИЗОТ-5012 или аналогичных им.

Амплитудное кодирование принятых сигналов двухуровневое, а временные выборки, определяемые местной шкалой времени, производятся с частотой 1 МГц. Соответственно этому энергетическая полоса частот записываемых сигналов составляет 500 кГц (квантование по времени с частотой Найквиста), а плотность записи информации на 8 параллельных дорожках магнитной ленты составляет 64 бит/мм. Такая плотность в два раза превышает номинальную для используемых НМЛ плотность записи. Повышение плотности записи, позволяющее вдвое расширить энергетическую полосу частот регистрации, обеспечено прежде всего применением магнитной ленты повышенного качества "ORWO" типа 64I, предназначеннной для видеомагнитофонной записи. При этом считается допустимой потеря некоторого количества (~0,1%) регистрируемой информации за счёт шумов записи без нарушения, естественно, временного масштаба записи, обеспечивающего специальным синхросигналом на отдельной дорожке магнитной ленты.

Информация на ленту пишется без разрывов на зоны методом БН- I. На рис. I.8 приведена временная диаграмма процесса записи. Движение ленты начинается автоматически по сигналу, поступающему от стандарта

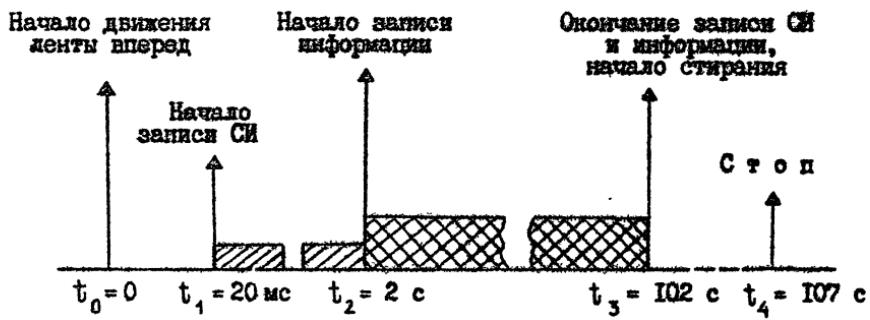


Рис. 1.8. Диаграмма процесса записи информации

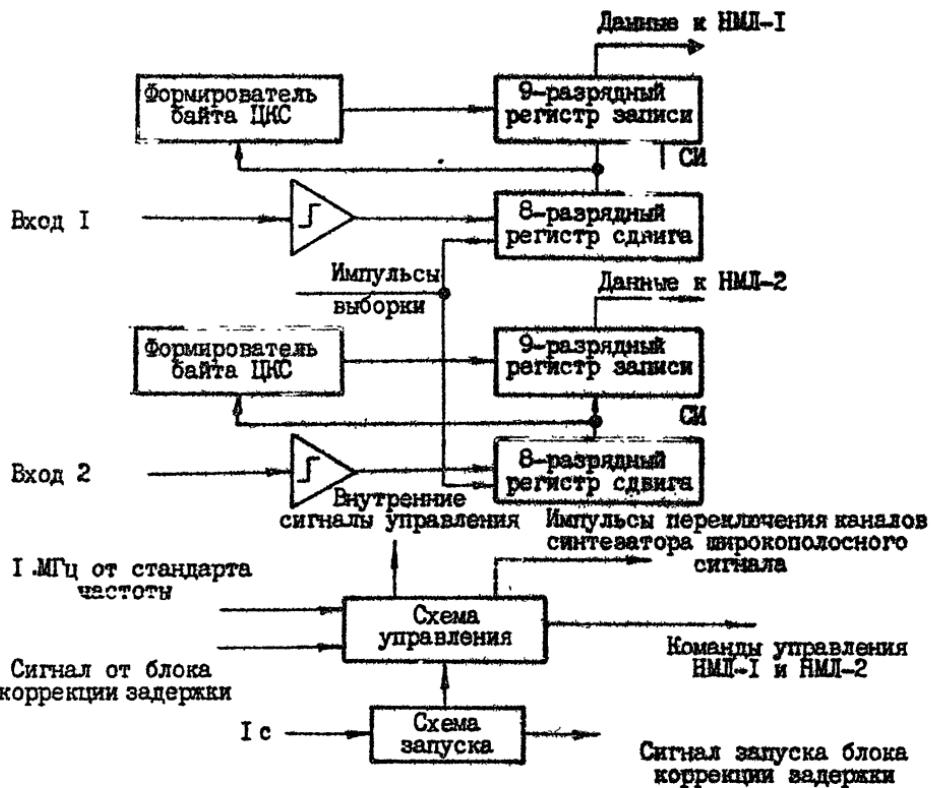


Рис. 1.9. Блок-схема системы копирования

времени-частоты.

Первые 20 мс используются для разгона НМЛ, далее в течение ~2 с производится запись только синхроимпульсов с частотой 125 кГц. Этот участок необходим для введения двух НМЛ в синхронизм системой приема информации при считывании магнитных записей в пункте обработки.

Стандартное время записи информативных сигналов составляет 100 с. После этого движение магнитных лент автоматически прекращается и система готова к проведению следующего сеанса записи. При необходимости длительность записи может быть сделана произвольной в режиме ручного управления остановом движения лент.

Основные элементы структурной схемы системы кодирования и регистрации информации приведены на рис. I.9.

Система содержит два независимых информативных канала для параллельной записи сигналов на два НМЛ.

Усилители-ограничители служат для двухуровневого квантования входных информативных сигналов. Усилитель построен на основе компаратора 521 СА2. Порог ограничения усилителя ~5мВ. Рабочая область частот - 1 кГц + 2 МГц. Выходной сигнал согласован по уровням с ТТЛ-логикой.

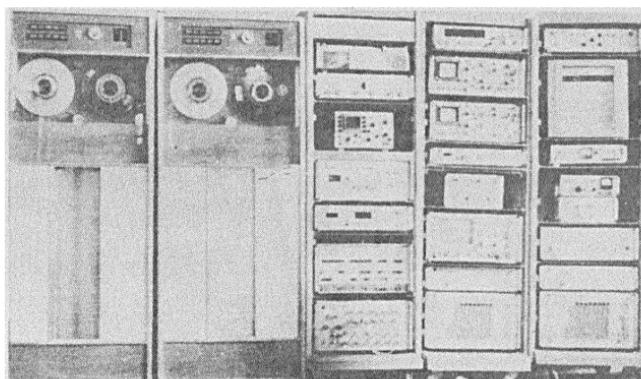


Рис. 1.10. Общий вид аппаратной комнаты на РСДБ-пунктах приема

Восьмиразрядные регистры сдвига обеспечивают временное кодирование поступающих сигналов и преобразование их в параллельный восьми-

разрядный код. Девятиразрядные выходные регистры обеспечивают запись сигналов на магнитные ленты методом БН-1. Схема запуска формирует сигнал включения схемы управления и сигнал запуска блока коррекции задержки. Схема управления вырабатывает сигналы, синхронизирующие работу отдельных элементов системы регистрации, выдаёт команды управления параллельно на два НМЛ и выдаёт импульсы для переключения частотных каналов в системе синтеза широкой полосы частот с периодом $\sim 0,5$ с или 6 с.

На рис. I.10 приведён общий вид аппаратной комнаты на РСДБ-пункт - тах приёма.

2. СИСТЕМА ОБРАБОТКИ И МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

2.1. Первичная обработка сигналов: приём информации из приёмных пунктов

Информационные сигналы, поступающие в пункт обработки интерферометра в виде магнитных записей, рассинхронизированы на величину $\Delta\tau_{рас} = \tau_g + \Delta t + \Delta\tau_{фл}$, где τ_g - геометрическая пространственная задержка между принятыми сигналами источника радиоизлучения на момент начала магнитной записи, Δt - рассинхронизация местных шкал времени, а под $\Delta\tau_{фл}$ следует понимать нестационарные флуктуации момента прихода идентичных отсчётов считанных с лент сигналов, обусловленные суммарными флуктуациями скоростей магнитоносителя при записи и считывании информации.

Система приёма информации осуществляет введение между считанными с лент сигналами постоянного сдвига - $(\tau_g + \Delta t)$, рассчитанного по априорным данным, а также - компенсацию флуктуирующего сдвига $\Delta\tau_{фл}$, что обеспечивает проведение дальнейшей обработки интерферометрической информации в реальном масштабе времени.

Система структурно разбита на две отдельные подсистемы. Первая - электромеханическая система представляет из себя схему управления скоростями ведущих двигателей НМЛ и предназначена для предварительной компенсации $(\tau_g + \Delta t)$ и медленных нестационарных флуктуаций скоростей магнитоносителей. Этот блок обеспечивает точность синхронизации двух считанных сигналов в пределах ± 10 байт (80 мкс) и позволяет ввести фиксированный сдвиг одного сигнала относительно другого в пределах ± 100 мс.

Вторая подсистема представляет из себя управляемую цифровую линию задержки, совмещённую с запоминающим устройством, и предназначена для окончательной синхронизации информативных сигналов с точным введением величины постоянного сдвига ($\tau_r + \Delta t$), рассчитанного по априорным данным.

2.2. Компенсация эффектов, обусловленных суточным вращением Земли

Непрерывное изменение пространственной разности хода сигналов от источника радиосигнала до антенн интерферометра за счёт вращения Земли внутри единичного сеанса наблюдения вызывает зависящий от времени допплеровский сдвиг частот между принимаемыми сигналами, что приводит к двум эффектам:

- 1) частота интерференционного отклика, пропорциональная средней частоте принимаемого сигнала, является функцией времени;
- 2) временная задержка между сигналами также подвержена регулярному изменению вследствие различия допплеровских сдвигов на различных частотах внутри полосы частот приёма. Скорость изменения частоты интерференции может достигать 1 Гц/с, а скорость изменения задержки – 1,5 мкс/с.

Для того, чтобы сохранить накапливаемую в течение сеанса измерения полезную энергию сигнала, эти эффекты должны быть скомпенсированы. Функциями системы компенсации эффектов суточного вращения Земли являются: 1) программный ввод в один из информативных сигналов гетеродинного сигнала, компенсирующего величину частоты интерференции (вместе с точным учётом её изменений); 2) программный ввод в один из информативных сигналов текущего временного сдвига. Погрешность учёта изменения частоты интерференции должна быть существенно меньше ширины линии интерференционного колебания I/T , а погрешность учёта изменения временной задержки – меньше времени корреляции информативных сигналов.

В радиointерферометре НИРЭИ функции системы компенсации эффектов суточного вращения Земли распределены по нескольким системам. Компенсация величины частоты интерференции на начало каждого сеанса измерения и компенсация изменения временной задержки для узкополосных ($\Delta f_{\text{эн}}$) сигналов, поступающих на магнитную запись, производится в пунктах приёма при проведении сеансов магнитной записи. Для каждого

сессии заранее рассчитывается величина $f_{\text{и}}(t_0)$, где t_0 – начальный момент записи, и величина $d\tau_r(t)/dt|_{t_0}$. Компенсация $f_{\text{и}}(t_0)$ производится путём соответствующей отстройки частоты гетеродина в тракте системы когерентного преобразования частоты одного из пунктов приёма. Компенсация изменения временной задержки для узкополосных сигналов производится с помощью специального устройства, корректирующего местную шкалу времени одного из пунктов приёма, представленную импульсным сигналом 1 МГц, используемым в системе кодирования для дискретизации информативного сигнала во времени. Коррекция производится дискретными шагами путём сдвига очередного квантующего импульса в программируемые моменты времени (рис. 2.2) на половину периода (0,5 мкс) влево (задержка) или вправо (опережение) в зависимости от знака скорости изменения задержки. Коррекция вводится в такие моменты времени, когда компенсирующая ступенчатая функция (рис. 2.1) отклоняется от идеально компенсирующей изменение задержки функции на половину одного скачка (0,25 мкс). Интервал времени между введением коррекции рассчитывается заранее, и информация о нём вводится в регистр памяти блока коррекции задержки перед началом сессии магнитной записи. Упрощенная структурная схема блока изображена на рис. 2.2. Синусоидальный сигнал 1 МГц от стандарта частоты удваивается по частоте и из него формируются короткие импульсы, частота следования которых затем делится на два. В моменты времени, определяемые времязадающим счётчиком, производится либо подавление очередного импульса 2 МГц с помощью схемы "И-НЕ" ("режим опережения"), либо – дополнительный переброс счётного триггера ("режим задержки"). Блок коррекции задержки обеспечивает любое значение скорости изменения задержки в пределах $\pm 1,5$ мкс/с с дискретностью ≤ 2 нс/с. Расчёты показывают, что принятая в системе процедура дискретной коррекции задержки уменьшает амплитуду интерференционного сигнала всего лишь на 4% при незначительном уширении линий интерференционного колебания.

Изменение временной задержки для широкополосных сигналов ($\Delta f_{\text{зф}}$) при синтезе широкой эффективной полосы частот оказывается в различии частот интерференции в разных частотных каналах синтеза, пропорциональном разносу частот каналов. Компенсация этого эффекта производится в РСДВ НИРФИ перед проведением одного из заключительных этапов обработки – спектрального анализа интерференционных колебаний, полученных на выходе каналов синтеза, путём соответствующей расчётной

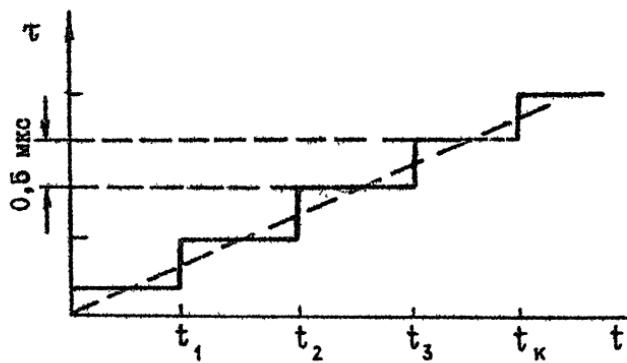


Рис. 2.1. Диаграмма процесса коррекции задержки

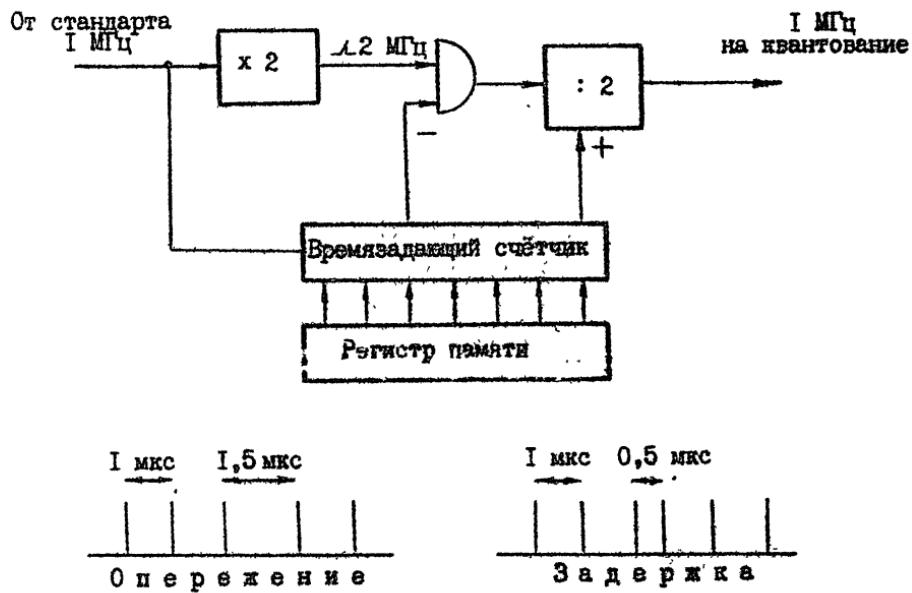


Рис. 2.2. Структурная схема блока коррекции задержки

корректировки частоты интерференционных колебаний.

Для компенсации изменения частоты интерференции в РСДВ НИРМП предусмотрено два варианта: с помощью специального программируемого устройства, работающего в реальном масштабе времени, а также - программным путём перед спектральным анализом интегроференционных колебаний на универсальной ЭВМ. Второй вариант не приводит к уменьшению величины полезного сигнала на выходе интерферометра, но область его применения распространяется лишь на умеренные длины баз интерферометра (≤ 2 тыс. км), на которых пределы изменения частоты интерференции за один сеанс измерения не превышают ~ 50 Гц. Это ограничение накладывается величиной времени накопления полезной энергии интерференционного колебания при предварительном корреляционном анализе 8 мс. Блок коррекции частоты вырабатывает знаковый гетеродинный сигнал с изменяющейся по следующему закону частотой:

$$\text{sign } s(t) = \text{sign} [\cos [(\Omega_0 + \beta'(t-t_0) + \gamma'(t-t_0)^2)(t-t_0)]], \quad (2.1)$$

где t_0 - начальный момент сеанса наблюдения источника, Ω_0 - некоторая начальная частота гетеродина, равная 200 Гц. Значения коэффициентов β' и γ' определяются зависимостью пространственной задержки τ_r от времени t .

В зависимости от момента времени t_0 коэффициенты β' и γ' могут принимать как положительные, так и отрицательные значения. Блок обеспечивает формирование гетеродинного сигнала при любом знаке γ' и только при положительных β' , т.е. частота гетеродина изменяется только в сторону увеличения с возрастающей ($\gamma' > 0$) или уменьшающейся ($\gamma' < 0$) скоростью.

Для образования знакового гетеродинного сигнала с изменяющейся частотой в устройстве применена схема счётчикового делителя частоты с переключаемым в определённые моменты времени коэффициентом деления. Моменты времени переключения задаются арифметическим устройством и определяют закон изменения частоты. Каждое переключение изменяет коэффициент деления счётчика на единицу и производится в тот момент времени, когда отклонение частоты гетеродина от заданного закона её изменения приближается к ширине полосы усредняющего фильтра Фурье-анализа (рис. 2.3). Упрощенная структурная схема блока коррекции частоты изображена на рис. 2.4.

На вход делителя частоты поступает периодический импульсный сигнал

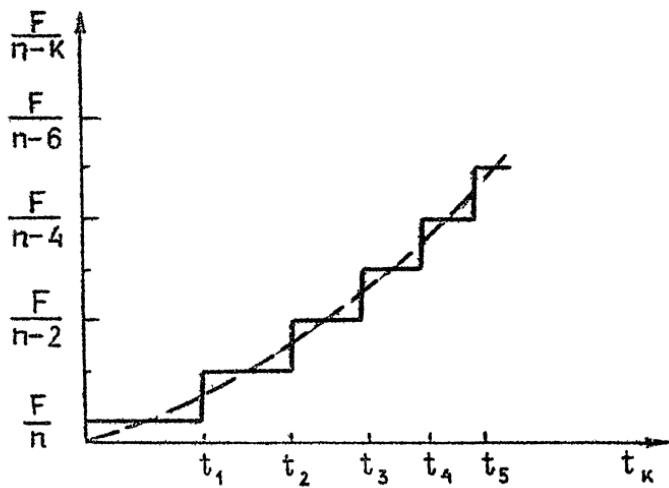


Рис. 2.3. Временная диаграмма процесса коррекции частоты

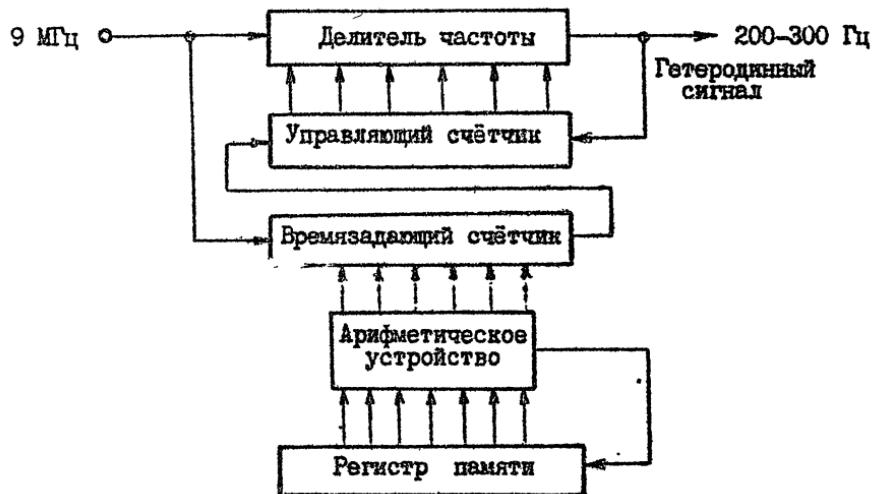


Рис. 2.4. Структурная схема блока коррекции частоты

частоты $F = 9$ МГц, а с выхода снимается гетеродинный сигнал частоты $f_k = F/(n-k)$, где $n = 4,5 \cdot 10^4$ - коэффициент деления в момент t_0 , k - число переключений частоты за интервал $(t - t_0)$. Максимальное число K_{max} не превышает $1,5 \cdot 10^4$ за время 100 с. Текущее значение коэффициента деления ($n - k$) определяет управляющий счетчик, а команды на переключение частоты вырабатывает времязадающий счетчик. Времязадающий счётчик управляетяется в свою очередь арифметическим устройством, которое вычисляет в процессе работы блока конкретные численные значения t_k .

Технические характеристики блока коррекции обеспечивают компенсацию изменения допплеровского сдвига частоты при длине проекции базовой линии радиоинтерферометра на экваториальную плоскость до 7 тысяч километров и несущих частотах - до 8 ГГц. Средняя погрешность отслеживания изменения частоты интерференции при этом не более 0,001 Гц за время наблюдения 100 с.

Знаковый гетеродинный сигнал смешивается с одним из двух знаковых информативных сигналов, поступающих из системы приёма информации, с помощью логической операции "исключающее ИЛИ". Такой процесс гетеродинирования приводит к некоторому уменьшению (из-за появления зеркального канала) амплитуды интерференционного колебания с коэффициентом потерь $\sim 0,7$.

2.3. Система предварительного корреляционного анализа

Система предварительного корреляционного анализа радиоинтерферометра НИРФИ вычисляет одновременно 30 точек корреляционной функции в темпе поступления информации с магнитных лент. Структурная схема коррелятора приведена на рис. 2.5. Информативные сигналы А и В поступают из системы приёма информации (один из сигналов корректируется по частоте в системе компенсации эффектов суточного вращения Земли) в виде двухуровневых импульсных последовательностей типа "меандр". Сигнал А поступает на 30 перемножителей, выполняющих операцию "исключающее ИЛИ", а сигнал В - на линию задержки, выполненную в виде 30-ти разрядного регистра сдвига, выход каждого разряда которого подключен ко второму входу соответствующего перемножителя. К выходу каждого перемножителя подключен двоичный счётчик числа совпадений знаков сигналов А и В. Каждый счётчик имеет 2^{13} двоичных разрядов, что определяет фиксированное время интегрирования 2^{13} мкс = 8,192 мс.

В конце очередного цикла интегрирований содержимое выбранных восьми разрядов каждого счётчика переносится в регистр буферной памяти, имеющий соответственно этому 8 двоичных разрядов. Содержимое всех 30-ти регистров памяти выводится на отдельный НМЛ блоками по 60 байт в стандартном формате записи для фиксированного значения временного сдвига.

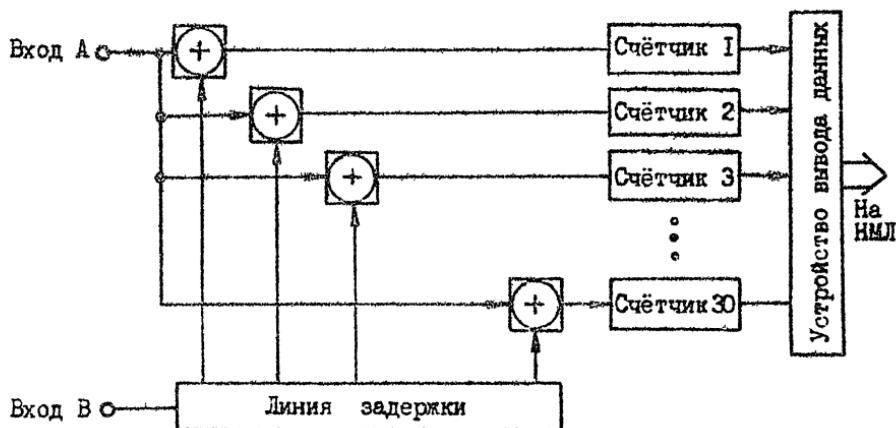


Рис. 2.5. Структурная схема коррелятора

Выбор 8-ми разрядов, считываемых на магнитную ленту, из 13-и двоичных разрядов интегрирующих счётчиков производится оператором на основе ожидаемой степени корреляции исходных информативных сигналов. Если ожидаемая корреляция близка к единице, то считаются 8 старших разрядов интегрирующих счётчиков. Если же степень корреляции заведомо меньше, то при считывании производится отсечение от I до 5 старших разрядов интегрирующих счётчиков, не несущих полезной информации (в этих разрядах либо все нули, либо - единицы), и считаются последующие 8 разрядов, из которых старший является фактически знаковым разрядом. Такая операция эквивалентна введению "усилению" в выходной сигнал коррелятора и позволяет избавиться от существенного влияния шумов квантования по амплитуде, возникающих от отбрасывания старших разрядов коррелятора, при обработке слабокоррелированных сигналов, не увеличивая в то же время количество считываемых разрядов - 8. Количество отсекаемых разрядов фиксируется и учитывается при даль-

нейшей обработке на ЭВМ.

2.4. Система спектрального анализа интерференционных сигналов

Система спектрального анализа вычисляет комплексный спектр сигналов, полученных в результате предварительного корреляционного анализа интерференционных записей отдельно для каждого канала синтезируемой полосы частот $\Delta f_{\text{зф}}$. В радиоинтерферометре НИРФИ спектральный анализ оценок корреляционной функции проводится либо на универсальной ЭВМ типа БЭСМ-6, либо на специально созданной для этих целей системе, построенной на базе мини-ЭВМ "Электроника-60".

Исходными данными, вводимыми в универсальную ЭВМ для проведения спектрального анализа, является четырёхмерный массив данных $R(\tau, t, n, t_1)$, представляющий собой набор значений взаимно-корреляционных функций, где τ - индекс, соответствующий номеру задержки, $\tau = 1, 2, 3, \dots, 30$; t - индекс, соответствующий номеру временного отсчёта корреляционной функции на каждом временном интервале между двумя соседними переключениями частотных каналов; n - номер частотного канала синтеза; t_1 - номер замкнутого цикла переключения частотных каналов.

Спектральный анализ при синтезе широкой полосы производится по следующему алгоритму

$$S_{\tau,n}(l) = \frac{1}{K} \sum_{k=0}^{K-1} R_{\tau,n}(k) e^{-j[2\pi(l)\frac{k}{K} + \varphi_n + \psi_n(k)]}, \quad (2.2)$$

где функция $R_{\tau,n}(k)$ определяется как

$R_{\tau,n}(k) = R(\tau, t, n, t_1)$ при $k = t_1 - 1 + (n-1)T^* + NT^*(t_1 - 1)$,
 $R_{\tau,n}(k) = 0$ при остальных k ; T^* - число отсчётов корреляционной функции на одном интервале переключения частотных каналов; N - число частотных каналов; $K = T^*NT_1$ - общее число отсчётов исходной функции R для фиксированного значения τ ; T_1 - количество полных циклов переключения частотных каналов; l - номер гармоники; φ_n - фазовые сдвиги, вводимые в каждый частотный канал, полученные при юстировке аппаратурного комплекса с помощью системы контроля групповой и фазовой задержек; $\psi_n(k)$ - изменяющийся со

временем фазовый сдвиг, компенсирующий разницу допплеровских сдвигов частоты в разных частотных каналах; если коррекция изменения частоты ингераференции из-за вращения Земли производится машинным способом, то сюда также входят соответствующие корректирующие добавки.

Массив комплексных чисел $S_{\tau,n}(l)$ представляет собой дискретное описание двумерной функции неопределенности для каждого n -го частотного канала.

Спектральный анализ "гладких" сигналов, без переключения частотных каналов, производится по алгоритму, аналогичному (2.2), но при условии

$$R_{\tau,n}(k) = R(\tau, t, n, t_1) \text{ - для всех } k;$$
$$\varphi_n = 0;$$
$$\Psi_n = \text{соответствует номеру обрабатываемого частотного канала.}$$

Общая стратегия обработки информативных сигналов на этом этапе сводится к следующему. Сначала, как правило, обрабатываются "гладкие", одноканальные записи исходных сигналов, которые были сделаны на приемных пунктах параллельно записям с синтезом широкой полосы. Они подвергаются спектральному анализу во всей области неопределенности групповой задержки ($30 + 60$ мкс) с вычислением модулей спектрограмм $|S_{\tau,n}(l)|$. По всему массиву полученных спектрограмм $|S_{\tau,n}(l)|$ производится поиск интерференционного отклика от источника по критерию превышения $|S_{\tau,n}(l)|$ некоторого выбранного порогового уровня. Обнаружение полезного сигнала позволяет точно определить частоту интерференции и - "грубо" - временную групповую задержку. Полученные таким образом значения τ и Ψ используются затем на заключительном этапе синтеза широкой полосы частот, существенно сокращая объем обрабатываемой на этом этапе информации.

Суммарное процессорное время, требуемое для описанной выше обработки записи длительностью 100 с в диапазоне 30 мкс по задержке и при полосе спектрального анализа 10 Гц составляет 11 минут.

На рис. 2.6 приведена структурная схема трёхпроцессорной системы, построенной нами в процессе создания астрометрического радиоинтерферометра НИРФИ для проведения спектрального анализа оценок корреляционных функций входных сигналов. Центральным процессором системы является процессор мини-ЭВМ "Электроника-60". Периферийные процессоры - процессор ЭВМ "Чекан", осуществляющий функцию канального устройства

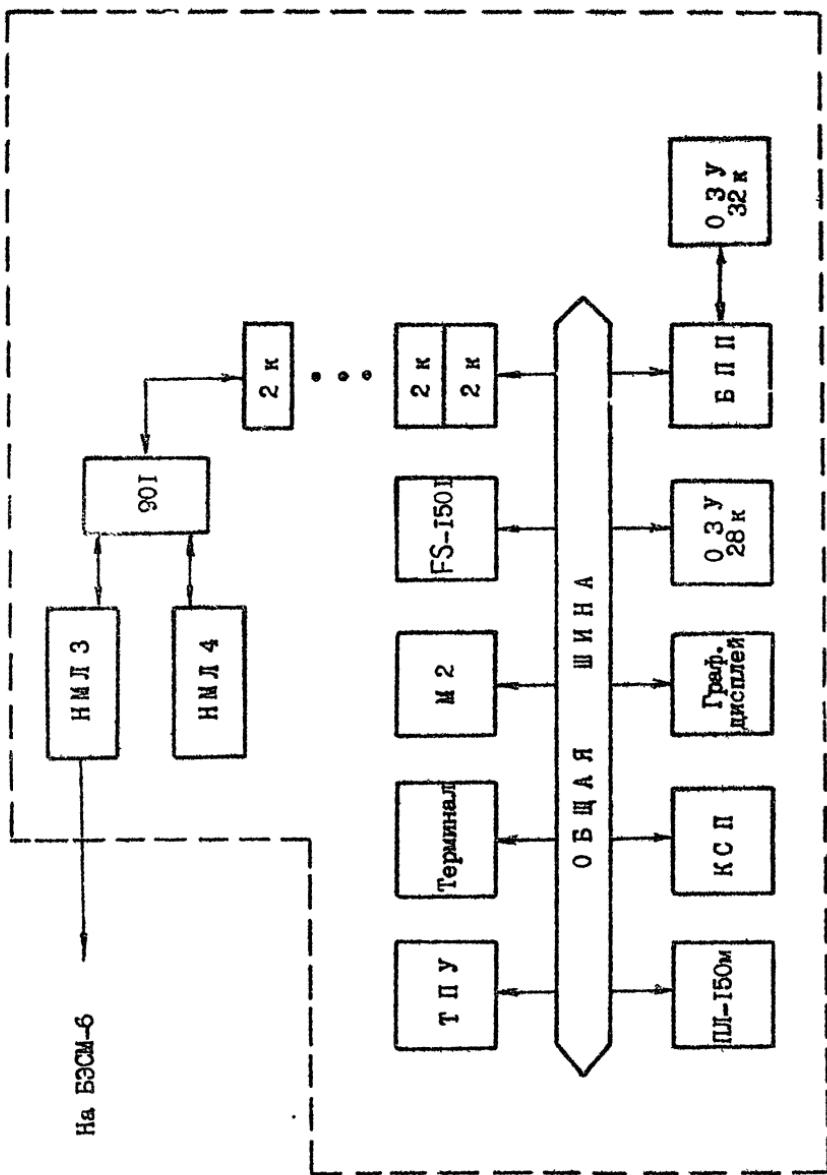


Рис. 2.8. Структурная схема трехпроцессорной системы спектрального анализа:
 901 - мини ЭВМ 901, М2 - процессор "Электроника-60", ТПУ - термопечатающее устройство,
 КСП - самописец типа КСП-4, БПП - быстродействующий перфокарный процессор

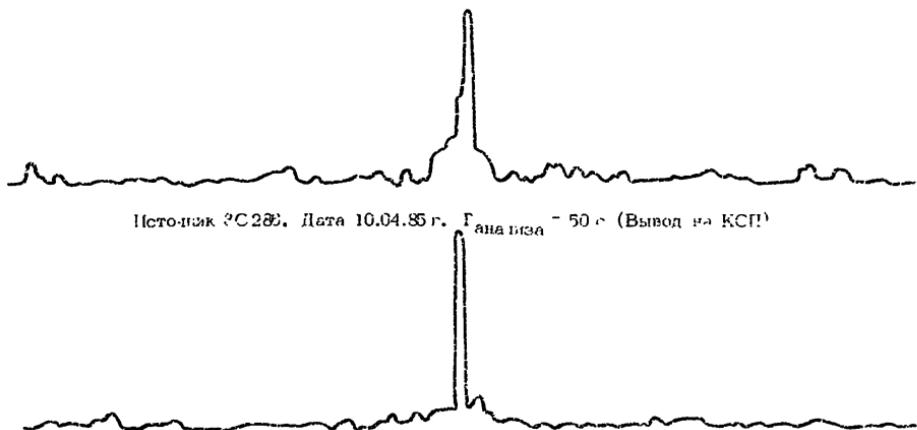
по обмену с накопителями на магнитной ленте типа "ИЗОТ 5012-03", и матричный быстродействующий процессор "МТ-70", реализующий алгоритм быстрого Фурье-преобразования (БФП) и непосредственно вычисляющий модуль спектрограммы $|S_\tau(l)|$. Связь всех процессоров осуществляется через общую область памяти.

Спектральный анализ осуществляется по алгоритму, приведенному в выражении 2.2 и производится в два этапа. На первом из них производится транспонирование данных, считанных с исходной магнитной ленты. В результате транспонирования отсчеты корреляционных функций для каждого из 30-ти временных сдвигов выстраиваются в хронологическом порядке и записываются вновь на магнитную ленту. При этом длина зон увеличивается до 1 Кбайт (на исходной ленте длина зон равна 60 байтам), что существенно уплотняет запись и уменьшает число прогонов ленты при обработке.

На втором этапе вычислений производится восстановление считанных с МЛ2 данных в тот вид, который они имели на выходах цифрового коррелятора, и умножение их на комплексную функцию, компенсирующую переменную часть дифференциальной допплеровской частоты $\phi_{\text{доп}}$. Затем осуществляется сам спектральный анализ и вывод результатов. Переменная часть $\phi_{\text{доп}}$ рассчитывается по отдельной программе предварительно, и значения её для каждого момента времени хранятся в ОЗУ. Далее происходит поиск сигнала по критерию сигнал/шум и печать результатов. Затем система переходит в диалоговый режим и по требованию оператора осуществляется просмотр интересующих его участков спектрограммы на графическом дисплее и, при необходимости, их документирование с выдачей графика на самописце КСП-4 и оцифровкой его на ТДУ.

На рис. 2.7 в качестве примера приведены результаты обработки реальной записи сигналов от источника ЗС 286, сделанной 10 апреля 1985 года на интерферометре Крым-Подмосковье (база 1200 км, $\lambda = 32$ см).

Созданная система спектрального анализа оценок корреляционной функции интерференционных сигналов в режиме поиска сигнала по 30-ти временным сдвигам τ и по 200 спектральным компонентам полностью обрабатывает одну запись длительностью 100 с за 63 минуты. В том случае, когда поиск сигнала по временной задержке не нужен, время обработки сокращается до 33 минут, а при использовании аппаратурной коррекции допплеровской частоты - до 23 минут. При этом необходимо отметить, что в любом из приведенных случаев 20 минут относятся к подготовительным операциям транспонирования и др.



Источник ЗС286. Дата 10.04.85 г. Ганализа = 100 с (Вывод на КСП)

Таблица 1

Таблица максимумов

| СДВИГ | АМПЛИТУДА | ГАРМОНИКА | ЧАСТОТА | БЛОК |
|-------|-----------------|-----------|-----------|------|
| 14 | 0.2738772E - 02 | 297 | 2.950430 | 1 |
| 14 | 0.8897327E - 03 | 35 | 0.3476937 | 1 |
| 14 | 0.1043914E - 03 | 1464 | 14.51933 | 1 |

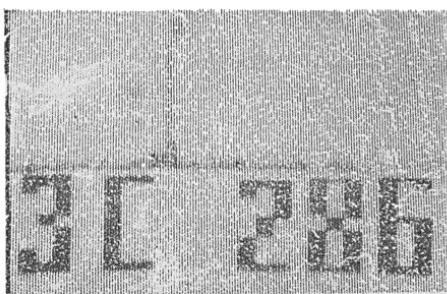
ВРЕМЯ АНАЛИЗА 100.6633 РАЗРЕШЕНИЕ 0.9234107E - 02

Таблица 2

Шифровка спектра сигнала

| АМПЛИТУДА | ЧАСТОТА |
|-----------------|----------|
| 0.3244063E - 03 | 2.900739 |
| 0.1584740E - 03 | 2.910393 |
| 0.3005633E - 03 | 2.920327 |
| 0.3571991E - 03 | 2.830562 |
| 0.3920054E - 03 | 2.940496 |
| 0.2738772E - 02 | 2.950430 |
| 0.3898223E - 03 | 2.960364 |
| 0.6276540E - 03 | 2.970298 |
| 0.3127121E - 03 | 2.980232 |
| 0.1304788E - 03 | 2.990166 |
| 0.2092180E - 03 | 3.000100 |
| 0.2830084E - 03 | 3.010034 |
| 0.1463572E - 03 | 3.019969 |

СРЕДНЕКВАДРАТИЧНОЕ ОТКЛОНение
0.6034285E - 04 ПО 0.00000 ГАРМОНИКАМ



Спектр источника ЗС286
на графическом дисплее
Время анализа = 100 с

Рис. 2.7

На рис. 2.8 приведён общий вид системы предварительной обработки данных радиоинтерферометра НИРФИ, включающий аппаратную часть для вычисления оценок корреляционных функций и трехпроцессорную систему спектрального анализа их.



Рис 2.8 Общий вид системы предварительной обработки данных радиоинтерферометра НИРФИ

2.5. Синтез отклика широкополосного интерферометра

На заключительном этапе обработки все "одноканальные" двумерные корреляционные функции когерентно суммируются между собой с фазовыми весами, восстанавливющими исходный разнос частот между каналами. В результате получается выходной сигнал интерферометра в виде функции неопределённости для случая широкополосных исходных сигналов. Положение главного максимума этой функции на плоскости $\{\tau, f_u\}$ определяет точные значения временной задержки и частоты интерференции. Алгоритм получения синтезированного отклика имеет вид:

$$R_1(\tau + \tau') = \sum_{n=1}^8 S_{n,\tau}(l) e^{-j[\omega_n(\tau' + \tau)]}, \quad (2.3)$$

где Π - номер частотного канала синтеза; \lfloor - выбранное значение частоты интерференции; τ - "грубый" отсчёт по задержке с дискретом $I/\Delta\tau_3$; ω_{Π} - частота Π -го канала синтеза; τ' - "точный" отсчёт по задержке, вводимый с дискретом 5 нс в интервале $\pm 0,5$ мкс относительно каждого "грубого" значения τ .

Массивы $|R_{\lfloor}(\tau + \tau')|$ записываются на магнитный диск и в дальнейшем выводятся на графопостроитель и АЦПУ для качественной и количественной оценок точного значения искомой групповой задержки τ и частоты интерференции. Время обработки одной исходной записи при 10-ти точках по частоте и 5-ти точках по "грубой" задержке составляет для программы синтеза около 2-х минут машинного времени.

2.6. Контроль групповых и фазовых задержек в трактах интерферометра

Важным условием для правильного проведения синтеза широкой полосы частот является сохранение фазовых соотношений между сигналами различных частотных каналов в том виде, в каком они существовали на входах приёмных трактов интерферометра. Неконтролируемые относительные фазовые сдвиги в каналах синтеза могут не только внести неопределенный сдвиг в величину измеряемой временной задержки, но и настолько исказить форму корреляционной огибающей синтезированного отклика интерферометра, что проведение измерений вообще станет невозможным.

Выявление и компенсация фазовых искажений является основной функцией системы контроля групповой и фазовой задержек интерферометра НИРФИ. Эта система организована следующим образом. На входы приёмных трактов интерферометра автономно в каждом приёмном пункте подаются импульсные сигналы, засинхронизированные от местных шкал времени. Эти сигналы, содержащие эквидистантную сетку гармонических составляющих в полосе приёма, проходят через приёмные тракты, собирая информацию о фазовых сдвигах различных гармоник, и затем записываются на магнитные ленты аналогично шумовым сигналам от космического радиоисточника. Спектр импульсных сигналов содержит, в частности, и такие гармоники, частоты которых совпадают со средними частотами каналов синтеза широкой полосы. В результате обработки таких сигналов определяются фазовые сдвиги между парами гармоник каждого частотного канала, прошедших разные приёмы тракта. Величины этих фазовых сдвигов вводятся (с противоположным знаком) в информативные сигналы соответствующих

частотных каналов при синтезе корреляционной огибающей во время обработки записей сигналов радиоисточников.

Исходные импульсные сигналы формируются с помощью блока формирователя сигнала контроля.

Восемь частотных каналов в системе синтеза широкой полосы частот 46 МГц формируются с помощью неравномерной сетки гетеродинных сигналов, частотный дискрет которой равен 2 МГц. Формирователь импульсного сигнала контроля должен формировать, следовательно, периодический импульсный сигнал с частотой следования импульсов 2 МГц и обеспечивать присутствие фазированных гармоник в сантиметровом диапазоне длин волн. Структурная схема формирователя представлена на рис. 2.9.

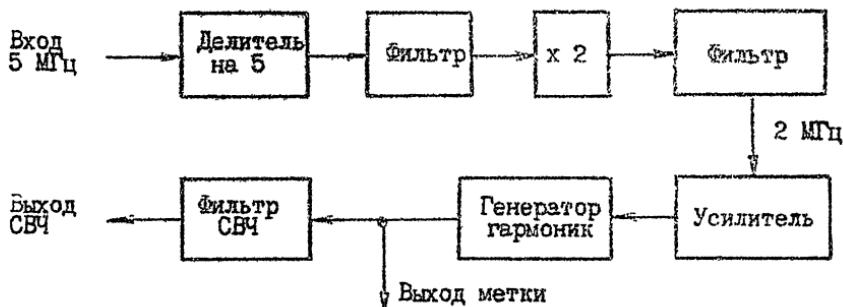


Рис. 2.9 Структурная схема формирователя сигнала
контроля $\lambda = 5$ см

Сигнал частоты 5 МГц от рубидиевого стандарта поступает на делитель частоты на 5, состоящий из амплитудного ограничителя, цифровой схемы деления и резонансного усилителя-фильтра; который формирует синусоидальный сигнал частоты 1 МГц. Затем из этого сигнала с помощью транзисторного умножителя формируется сигнал с частотой 2 МГц, который, после прохождения через усилитель мощности УМ, поступает на генератор гармоник ГГ. Генератор гармоник, выполненный на диоде с накоплением заряда (ДНЗ), образует периодическую последовательность импульсов длительностью 0,1 нс с частотой повторения задающего сигнала - 2 МГц. Согласованной нагрузкой генератора гармоник является полосовой фильтр сантиметрового диапазона с линейной фазовой характеристикой и полосой частот пропускания 300 МГц. Центральная частота фильтра настроена на среднюю частоту приёма интерферометра. В полу-

ченном таким образом сигнале контроля содержатся сфазированные гармонические составляющие, совпадающие в том числе и с частотами каналов синтеза, и когерентные с сигналом 5 МГц задающего стандарта частоты. Для проведения контрольной процедуры выходной сигнал с блока формирователя подаётся на вход приёмной системы вместо сигнала с облучателя антенны. Блок формирователя имеет также дополнительный выход, на который через развязывающую цепь подан импульсный сигнал с генератора гармоник. Этот сигнал может быть использован как "точная" шкала времени приёмного пункта, если целью РСДВ-измерений является прецизионная сверка шкал времени в приёмных пунктах методами радиоинтерферометрии.

С помощью синтезаторов частоты ЧБ-58 (ЧБ-31), участвующих в формировании сигналов гетеродинов, производится сдвиг частоты приема таким образом, чтобы на выходах видеотракта синтезатора широкой полосы одного из пунктов приёма наблюдался синусоидальный сигнал частоты 10 кГц. Во втором приёмном пункте частота гетеродина устанавливается так, чтобы сигнал на выходах видеотрактов отличался от 10 кГц на малую величину (3 Гц).

Очевидно, что при подключении любого из восьми каналов синтеза на выходе системы синтеза широкой полосы будут наблюдаться сигналы одной и той же частоты, но с разными фазовыми сдвигами, зависящими от фазовых искажений в приёмных трактах. Эти сигналы записываются на магнитные ленты в режиме синтеза широкой полосы, и паразитные фазовые сдвиги между сигналами одноимённых частотных каналов разных пунктов приема выявляются в процессе обработки контрольных записей и учитываются при обработке сигналов космических радиоисточников. Интерференция между контрольными сигналами всех частотных каналов наблюдается на частоте расстройки 3 Гц.

На рис. 2.10 представлены результаты обработки по программе синтеза широкой полосы частот контрольного сигнала до введения фазовых поправок. Сильная расфазировка каналов синтеза очевидна. На рис. 2.11 показаны результаты обработки по программе синтеза того же сигнала, но уже после выявления величин фазовых сдвигов всех частотных каналов и введения соответствующей коррекции. Форма синтезированной корреляционной огибающей соответствует расчётной, а её главный максимум находится на нулевом временном сдвиге, что иллюстрирует тот факт, что отсчётная шкала временных задержек интерферометра привязана к временным шкалам, задаваемым сигналами контроля. Наша практика пока-

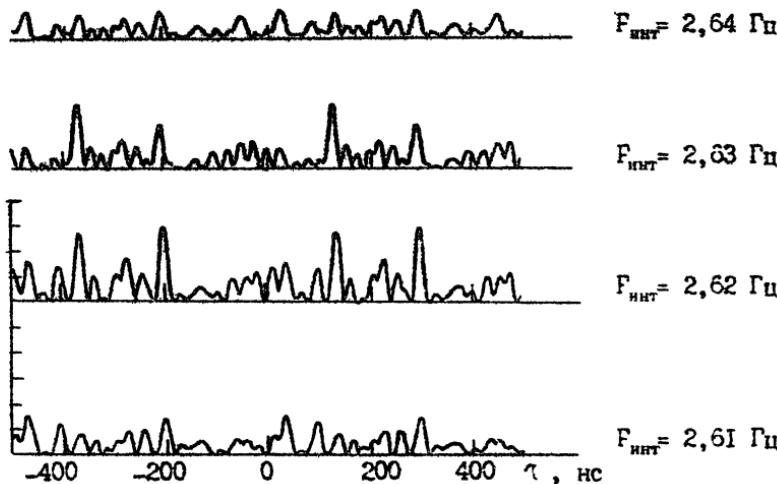


Рис. 2.10. Синтез широкой полосы частот по контрольному сигналу до введения фазовой коррекции

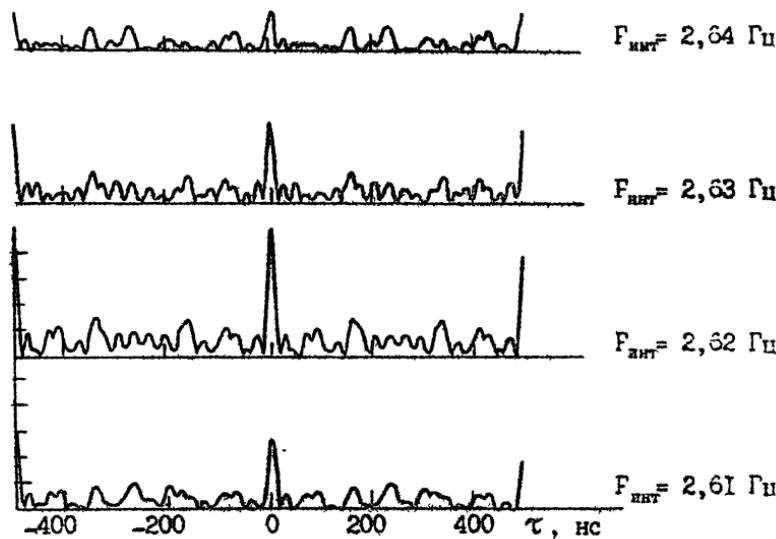


Рис. 2.11. Синтез широкой полосы частот по контрольному сигналу после введения фазовой коррекции

зала, что процесс фазовой калибровки аппаратурного комплекса достаточно делить три-четыре раза в течение суточного цикла наблюдения радиоисточников.

3. ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Первые испытания работоспособности аппаратурного комплекса РСДБ НИРФИ были проведены в декабре 1979 года и в апреле и ноябре 1980 года. Базу интерферометра образовывали два параболических полноповоротных зеркала диаметром 25 м, удаленных друг от друга на 150 метров. Приём радиоизлучения велся в сантиметровом диапазоне длин волн. Основной целью этих экспериментов была проверка пригодности всех систем для проведения измерений на больших базах. Был также организован режим работы радиоинтерферометра с кабельными линиями связи между антеннами, который служил в качестве контрольного для РСДБ-системы. В связи с этим в дополнение к описанному выше аппаратурному комплексу были добавлены специально разработанные узкополосный знаковый коррелятор, подключаемый к видеовыходам системы синтеза широкой полосы частот с шириной энергетической полосы частот 500 кГц, и широкополосный аналоговый коррелятор, подключаемый к трактам второй промежуточной частоты и работающий с полосой частот сигнала 50 МГц. Результат корреляционной обработки подвергался затем спектральному анализу с помощью низкочастотного анализатора спектра С4-54, где осуществлялось накопление сигнала. Такая обработка интерферометрических сигналов, имитирующая структуру штатной системы обработки РСДБ-комплекса НИРФИ, позволяла проводить сравнение результатов эксперимента, полученных обоими способами, с целью выявления возможных искажений информации при промежуточном переносе её на магнитную ленту и дальнейшей цифровой обработке.

В ходе проведения этих экспериментов значительную долю усилий пришлось затратить на поиск подходящего для работы диапазона частот приема, в достаточной степени свободного от искусственных помех в эффективной полосе частот приема 50 МГц. Такой диапазон был найден в районе $\lambda \approx 5,4$ см.

На рис. 3.1 показаны спектограммы интерференционных колебаний от калибровочного радиоисточника DR -21, который не разрешен на этой базе (общий поток ~ 20 ед. потока), и квазаров ЗС 273 и ЗС 454,3, пригодных для измерений на большой базе. Приём сигналов велся в однока-

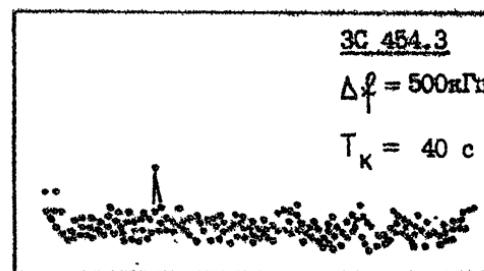
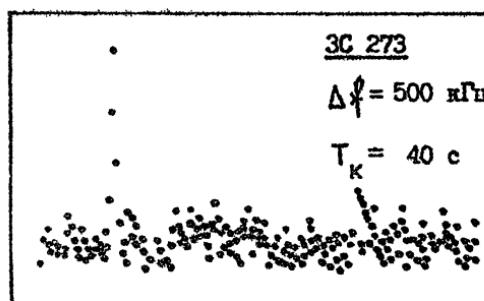
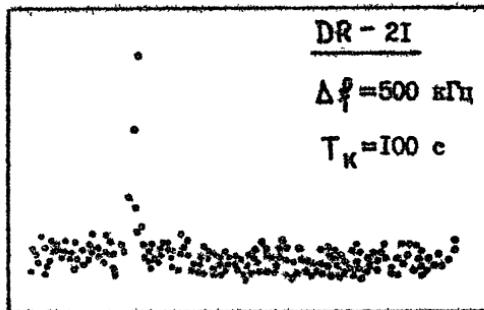


Рис. 3.1 Интерферометрия $\lambda = 5 \text{ см}$, база 150 метров

нальном режиме (полоса частот 500 кГц), результаты получены с помощью энчакового коррелятора непосредственно в процессе наблюдения радиоисточников. DR-2I наблюдался с временем когерентного накопления $T = 100$ с, ЗС 273 и ЗС 454.3 - с $T = 40$ с. Приведённые данные показывают реальную чувствительность интерферометрического комплекса, включая использовавшиеся антенны.

Полная проверка работы всего РСДБ-комплекса осуществлялась при использовании малобазовой системы с линиями связи, служившей контрольной системой. Гетеродинные сигналы в обоих приёмных пунктах формировались от двух разных рубидиевых стандартов частоты ЧИ-69. На рис. 3.2. показан вид спектра интерференционного колебания от радиоисточника Лебедь А, полученный в реальном времени с помощью малобазовой системы. Частотное разрешение на спектограмме - 0,025 Гц, что соответствует времени когерентного накопления энергии сигнала 40 с, полоса частот приёма 500 кГц.

Одновременно сигналы с выходов одного частотного канала синтезаторов широкой эффективной полосы частот регистрировались на магнитные ленты. Результат корреляционного и спектрального анализа этих записей, проведённого с помощью штатной системы обработки РСДБ НИРФИ, показан на рис. 3.3. Сравнение спектрограмм показывает, что потери корреляции при промежуточном переносе информативных сигналов на магнитные ленты, обусловленные операцией выборки, характеризуются коэффициентом $\sim 0,92$. Хорошая форма спектральной линии интерференционного колебания на приведённых спектрограммах свидетельствует также о том, что система когерентного преобразования частот РСДБ НИРФИ не вносит существенных искажений в выходной сигнал.

В экспериментах на малой базе с целью отработки методики пространственно-временной привязки разнесённых пунктов (ПВП) были проведены измерения некоторых параметров базы. Исходными экспериментальными данными служили значения пространственной задержки T , измерявшейся с помощью широкополосного аналогового коррелятора. Ширина главного лепестка корреляционного отклика коррелятора имеет величину около 20 нс (полоса частот приёма 50 МГц). Было сделано 4 отсчёта задержки, равномерно распределённых в интервале времени 4 часа, при наблюдении радиоисточника Лебедь А. Координаты радиоисточника считались известными. На основе этих данных были определены три параметра: $(S_p \sin \delta + \Delta t)$, $S_e \cos \delta$ и Ψ , где S_p и S_e - соответственно проекции базовой линии на полярную ось и экватор Земли, Ψ - долгота вектора

ЛЕБЕЛЬ-А
Получено в процессе
наблюдений
 $T = 40\text{с}$

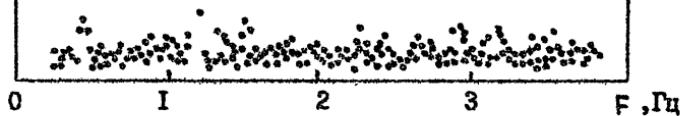


Рис. 3.2. Интерферометрия $\lambda = 5$ см, база 150 метров
независимые гетеродины

ЛЕБЕЛЬ-А
Получено на системе
обработки данных
PCДВ НИРФИ
 $T = 50$ с

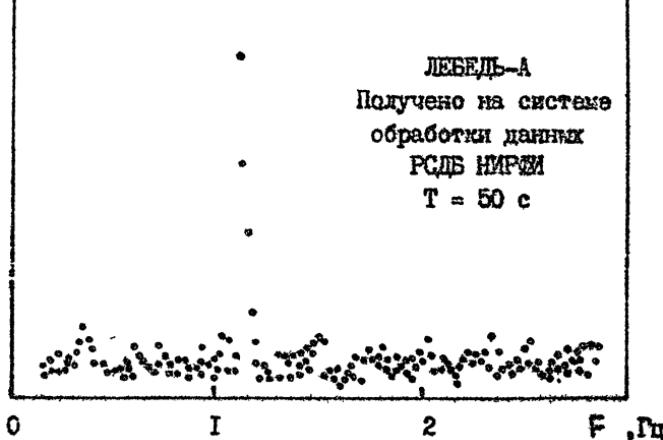


Рис. 3.3. Интерферометрия $\lambda = 5$ см, база 150 метров,
независимые гетеродины

базы, Δt - ошибка синхронизации шкал времени, вызванная в данном случае возможной неточностью учёта электрических длин кабельных линий связи, δ - склонение источника излучения. В табл. I приведены полученные результаты вычислений погрешности значений параметров, указанных выше.

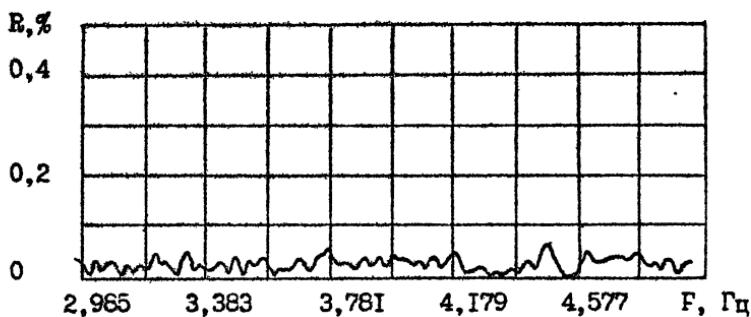
Т а б л и ц а I

| П а р а м е т р | : Среднеквадратичная ошибка |
|----------------------------------|-----------------------------|
| ($S_p \sin \delta + \Delta t$) | 0,46 м |
| $S_e \cos \delta$ | 0,20 м |
| Ψ | 0,006 |

Среднеквадратичное отклонение экспериментальных значений T от модели зависимости задержки от времени с уточнёнными в измерениях значениями параметров базы составило 0,17 нс (или 5 см в пересчёте на пространственную разность хода). Напомним, что точность измерения длин проекций S_p и S_e не зависит от длины базы, а точность определения Ψ соответственно увеличивается прямо пропорционально длине базы. Таким образом, результаты эксперимента практически подтвердили принципиальную возможность осуществлять пространственно-временную привязку удалённых пунктов приёма с высокой точностью.

Положительные результаты проведённых исследований позволили перенести дальнейшие эксперименты на большую базу. Для этого в 1981 году был оборудован и опробован в автономном режиме второй приёмный пункт РСДБ в Подмосковье на основе аналогичной параболической антенн диаметром 25 метров.

В мае-июне 1982 года и в июне 1983 года были проведены первые с данным аппаратурным РСДБ-комплексом на $\lambda = 5,4$ см наблюдения на базе Крым-Подмосковье длиной ~ 1200 км. На рис. 3.4 приведены спектрограммы интерференционных колебаний, полученных от источника ЗС 273 в одноканальном режиме с временем когерентного накопления 50 с. Спектрограммы приведены для трёх соседних сдвигов по временной задержке (дискрет по задержке равен 1 мкс). В целом результаты этих экспериментов показали работоспособность комплекса на больших базовых линиях. Однако, источник ЗС 273, наиболее интенсивный из квазаров, оказался единственным, от которого была получена интерференция с достаточной степенью достоверности. Потенциал комплекса по чувствительно-



3C 273
30.05.83г. 18^h20^m

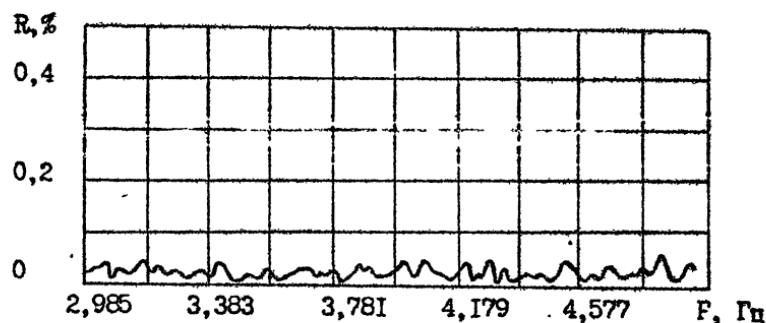
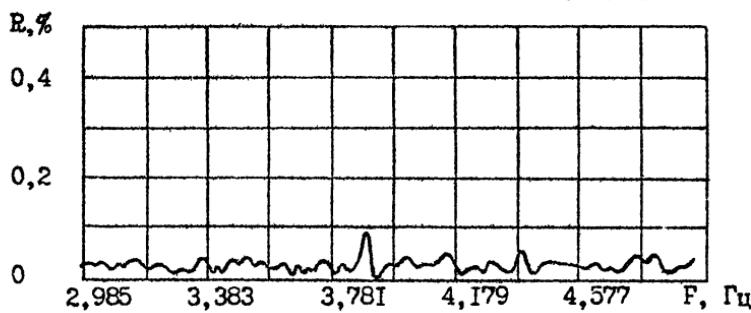


Рис. 3.4. Интерферометрия $\lambda = 5$ см, база 1200 км, $T = 50$ с

сти оказался недостаточным для уверенного получения интерференционных сигналов с достаточно большой группы источников радиоизлучения. Поэтому было признано необходимым в дальнейших экспериментах использовать в одном из пунктов приёма Большой Крымский радиотелескоп П-2500 (РТ-70) ///. Применение этой антенны позволило увеличить чувствительность интерферометрических наблюдений примерно в 3 раза. Работы на РТ-70 осуществлялись совместно и в сотрудничестве с ИИИ АН СССР (тт. Рудаков В.А., Алтунин В.И., Кухарский А.С., Кнорин И.А., Бирюков А.В.).

Первые пробные радиоинтерферометрические наблюдения с использованием РТ-70 и РТ-25 были проведены в декабре 1983 года и в феврале 1984 года в диапазоне длин волн 32 см на базе длиной около 4-х километров. Приёмные пункты были соединены двумя ВЧ линиями связи: относительно узкополосной линией для передачи информативного сигнала по тракту ПЧ с одного приемного пункта на другой и фидерной линией для передачи сигнала 5 МГц от стандарта частоты. Информативный сигнал от РТ-70 транслировался по промежуточной частоте во второй приемный пункт, где были сосредоточены оба комплекта систем синтеза широкой полосы и систем кодирования и регистрации информации. В этих экспериментах были организованы как РСДБ-режим работы интерферометра, так и режим с общим задающим стандартом частоты и с обработкой информации в реальном масштабе времени непосредственно в процессе наблюдения радиоисточников. В РСДБ-режиме работы системы когерентного преобразования сигналов синхронизировались стандартами частоты ЧI-69 и ЧI-50 автоматично в каждом приемном пункте, а видео-сигналы с выходов систем синтеза широкой полосы частот регистрировались на магнитных лентах в одноканальном режиме.

В экспериментах наблюдалась интерференция от шести квазаров и радиогалактик: ЗС 273, ЗС 274, ЗС I47, ЗС 295, ЗС I96 и ЗС I23. На рис. 3.5 показаны спектрограммы интерференционных колебаний от радиоисточника ЗС 273 с общим стандартом частоты. На рис. 3.6 представлена также интерференция от ЗС 273, но с независимыми гетеродинами. Сравнение рис. 3.5 и рис. 3.6 показывает разницу частот интерференционных откликов, вызванную разностью номиналов частоты стандартов ЧI-50 и ЧI-69. При этом в случае независимых гетеродинов уже ощутимо искающие линии спектра для такого времени накопления (100 с), которое превышает предельный расчётный интервал когерентности использовавшегося в одном из пунктов приёма стандарта час-

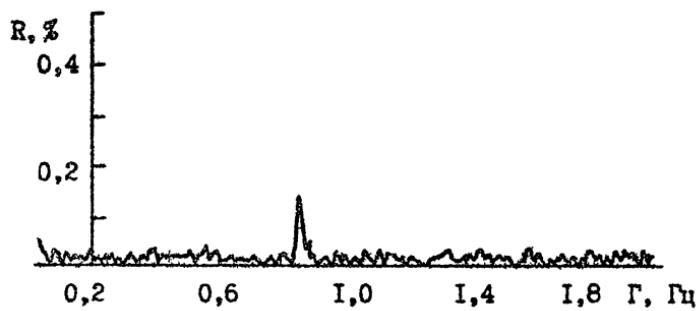
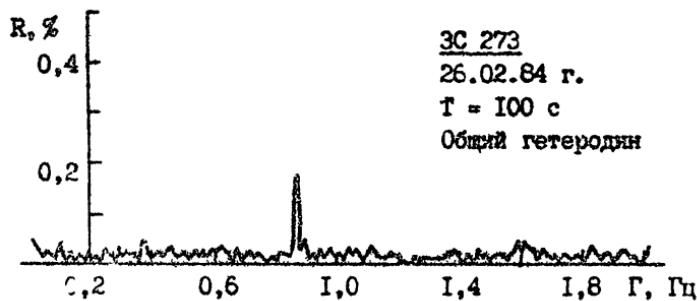
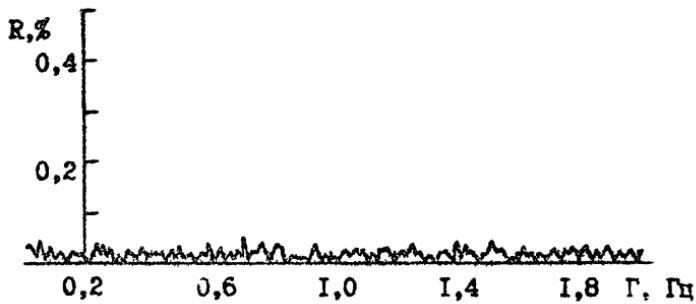


Рис. 3.5. Интерферометрия $\lambda = 32$ см, база 4 километра

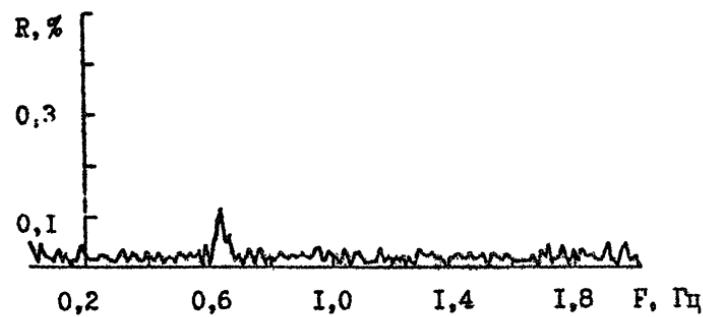
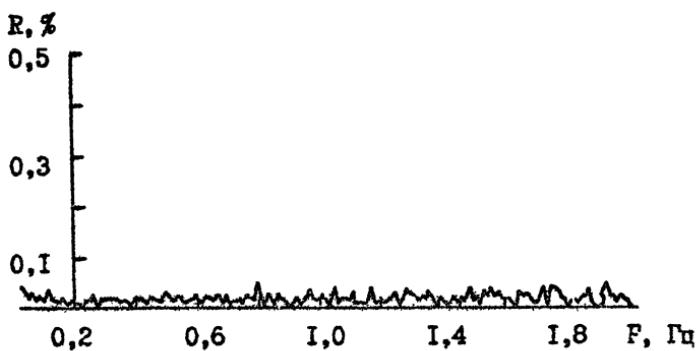


Рис. 3.6. Интерферометрия $\lambda = 32$ см, база 4 километра

тоты ЧI-50 (около 60 с). Отметим, что при использовании в обоих пунктах стандартов частоты ЧI-69 время когерентного накопления при приёме сигналов на $\lambda = 32$ см составляет 500 с.

В ходе этих экспериментов было выполнено решение задачи пространственно-временной привязки (ПВП) приёмных пунктов. Использовались результаты обработки магнитных записей сигналов пяти радиоисточников: ЗС 273, ЗС 147, ЗС 295, ЗС 123 и ЗС 196. Исходными информативными данными служили 8 значений временной задержки τ и 8 значений частоты интерференции, отсчёты которых были проведены в разные дни в промежутке от 25 февраля по 29 февраля 1984 года, начиная с $0^{\text{h}}30^{\text{m}}$ по $3^{\text{h}}40^{\text{m}}$ декретного московского времени. Поскольку режим синтеза широкой полосы частот в этих наблюдениях не использовался (из-за наличия только лишь узкополосной линии связи между пунктами по информативному сигналу), точность отсчёта задержки ограничивалась энергетической полосой регистрации сигнала на магнитную ленту 500 кГц, в связи с чем точность измерения τ не достигала потенциала системы. Отсчёты τ брались с дискретом 100 нс, а отсчёты частоты интерференции – 0,005 Гц.

Неизвестными и подлежащими определению параметрами в задаче ПВП являлись три проекции базовой линии S_x , S_y и S_z в экваториальной декартовой системе координат, а также – иммитирующая рассинхронизацию шкал времени в пунктах приёма величина Δt – разность задержек информативных сигналов в кабельных линиях связи, соединяющих зеркальные кабины приёмных антенн и аппаратное помещение интерферометра. В этом эксперименте гетеродины в обоих приёмных пунктах синхронизировались опорным сигналом от одного стандарта частоты, вследствие чего среди неизвестных параметров отсутствует разность номиналов частоты. В остальном решавшаяся задача полностью соответствует задаче ПВП на больших длинах баз. Расчёты проводились способом наименьших квадратов с вычислением невязок τ и $\varphi_{\text{инт}}$. Среднеквадратичная невязка задержки равна ~ 50 нс (15 м в пространственном выражении), а частоты интерференции $\sim 0,008$ Гц (≤ 35 метров); по существу эти величины характеризуют точность определения параметров базы. Для определения состоятельности оценки величины $\Delta t = -19,96$ мкс, полученной из интерферометрических данных, в ходе эксперимента была независимо измерена разность электрических длин информативных линий связи между кабинами антенн и аппаратным помещением методом импульсной рефлектометрии. Эти измерения дали величину $\Delta t = 19,9 \pm 0,1$ мкс.

Отметим, что точность измерения временной задержки τ , основного источника информации в астрометрических РСДБ-измерениях, при использовании режима работы с синтезом широкой эффективной полосы частот должна вырасти приблизительно в 50 раз, пропорционально расширению эффективной полосы частот приема.

В июне 1984 года РСДБ-эксперименты с использованием РТ-70 были перенесены на большую базу Крым-Подмосковье. Второй антенной по-прежнему служил рефлектор диаметром 25 метров. Интерферометрические наблюдения проводились в диапазоне $\lambda = 32$ см. В обоих пунктах приёма применялись рубидиевые стандарты частоты-времени ЧИ-69. Шкалы времени синхронизировались по сигналам радиостанций РНС-Е и УТР-З. В части сеансов магнитной записи на южном пункте в качестве приёмной системы использовался штатный малошумящий мазер радиотелескопа РТ-70. Поскольку мазер является относительно узкополосной системой, эти магнитные записи производились только в одноканальном режиме ($\Delta t = 500$ кГц) без синтеза широкой полосы частот.

Эксперимент в целом прошёл успешно. Была получена интерференция от всех шести наблюдавшихся космических радиоисточников: ЗС 273, ЗС 380, ЗС 454,6, СТА-102, ЗС 84 и ЗС 286.

На рис. 3.7 - 3.9 приведены примеры полученных результатов обработки одноканальных магнитных записей сигналов от источников СТА-102, ЗС 84 и ЗС 454,3. Во всех этих случаях в южном пункте приёма использовался мазер. Время когерентного накопления было равно 100 с, полоса регистрации - 500 кГц. Каждая спектрограмма соответствует фиксированному временному сдвигу между магнитными записями, вводимому с дискретом 1 мкс. На рис. 3.10 приведён пример результата синтеза ШПЧ в виде корреляционных огибающих широкополосных сигналов двух записей источника ЗС 273 для трёх соседних значений частоты интерференции. Средний график соответствует точному отсчёту по частоте интерференции. Неоднозначность отсчета задержки в 500 мс, соответствующая шагу сетки частот синтеза в 2 МГц, устраняется "одноканальной" корреляционной огибающей, определяемой энергетической полосой частот записи информации на магнитную ленту 500 кГц. Формальная погрешность отсчёта положения максимума корреляционной огибающей по оси временных задержек для графика на рис. 3.10 составляет 0,7 нс.

Начиная с июня 1984 года нами совместно с ИКИ АН СССР были начаты опыты по сверхдлиннобазовой интерферометрии радиоисточников искусственного происхождения - бортовых передатчиков автоматических меж-

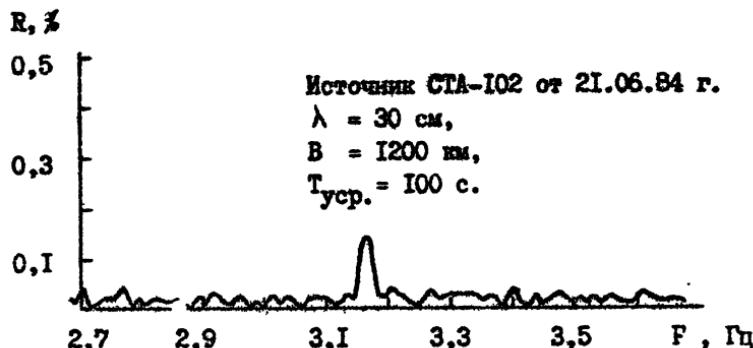


Рис. 3.7. Интерферометрия $\lambda = 32 \text{ см}$, база 1200 километров

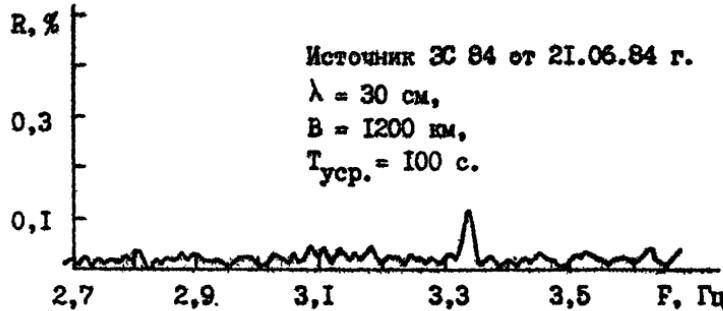
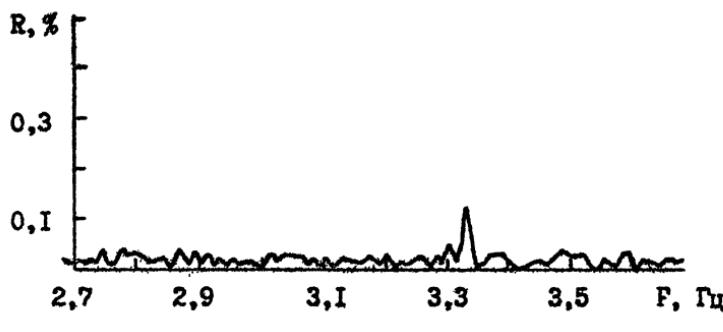


Рис. 3.8. Интерферометрия $\lambda = 32 \text{ см}$, база 1200 километров

ЗС 454.3 21.06.84 г. ДМВ 03.20

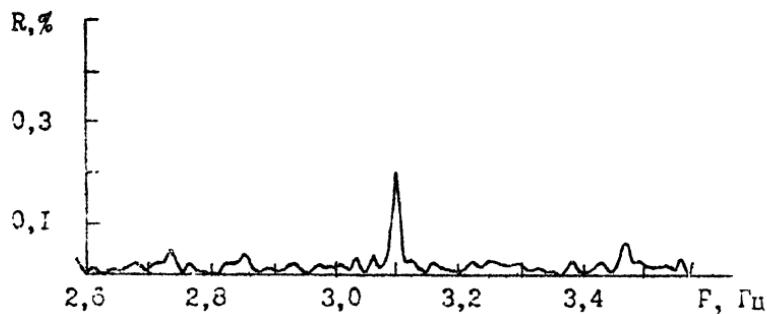
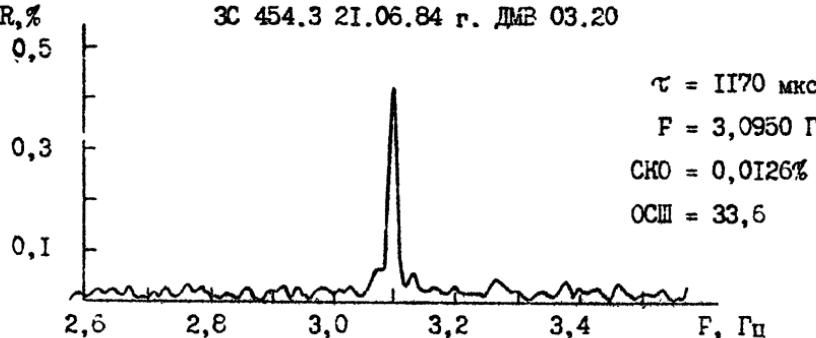


Рис. 3.9. Интерферометрия $\lambda = 32 \text{ см}$, база 1200 километров,
время накопления 100 с

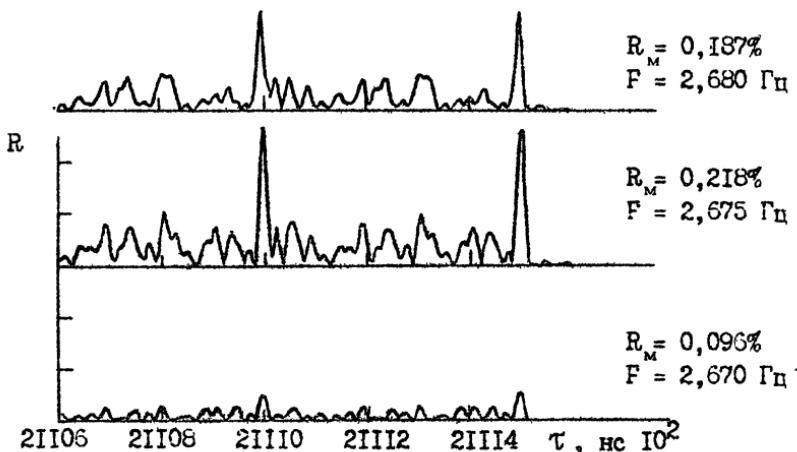


Рис. 3.10. Отклик от источника ЗС 273 в синтезированной широкой полосе

планетных станций. Эти опыты были продолжены затем в апреле 1985 года.

Приступая к экспериментам по РСДБ-наблюдениям космических аппаратов в качестве основной цели мы имели в виду отработку методики точного определения их местоположения на небе в системе координат, задаваемой удалёнными космическими радиоисточниками малых угловых размеров. 29 июня 1984 года в дециметровом диапазоне длин волн были проведены первые наблюдения АМС "Венера-15", находящейся на орбите искусственного спутника Венеры. Было проведено два сеанса магнитной записи в 8^h00^m и 8^h20^m ДМВ. Во время наблюдений Венера находилась за Солнцем на расстоянии ~250 млн. км от Земли. Видимое угловое расстояние от Солнца составляло около 3°, то есть трасса распространения сигналов проходила вблизи от Солнца, что обусловило сильное влияние потоков околосолнечной плазмы на распространение сигналов. База интерферометра составляла угол с направлением на АМС около 70°, и расстояние между лучами зрения на источник из приёмных пунктов интерферометра составляло на траверзе Солнца около 500 км, что превышает характерный размер неоднородностей солнечного ветра /8/. Взаимно некоррелированные фазовые флуктуации на трассах распространения сигналов от источника до приёмных пунктов интерферометра, а также вызванные неоднородностями амплитудные мерцания (влияние которых на спектральные характеристики сигналов, впрочем, существенно меньше /8/), привели к сильному размытию спектральной линии интерференционного колебания. На рис. 3.II приведён типичный вид наблюдавшегося спектра интерференционного колебания при времени когерентного накопления 1,5 с. На рис. 3.I2 показан результат некогерентного суммирования таких спектрограмм за время магнитной записи около 200 с. Вопрос с точных координатных измерениях в такой ситуации, естественно, отпадает, поскольку величина частоты интерференции является основным информативным параметром в этой задаче (излучаемый АМС сигнал узкополосный, точное измерение τ невозможно). Однако, оказалось, что сверхдлиннобазовая интерферометрия может служить мощным методом исследования неоднородностей околосолнечной плазмы.

Положительные результаты проведённого в июне 1984 года эксперимента позволили в дальнейшей работе приступить к решению целевых задач. Следующий РСДБ-эксперимент состоялся в декабре 1984 года на той же базе и на том же диапазоне длин волн. Основной целью его было решение задачи точного определения параметров базовой линии. Для этого было выбрано шесть радиоисточников: ЗС 454.3, ЗС 380, ЗС 286, ЗС

273. ЗС 84 и ЗС 279. Объединяя их в группы по 2-5 источников, провели четыре цикла записей средней продолжительностью около 10 часов каждый. Один цикл содержал 10 + 15 сеансов магнитной записи сигналов радиоисточников продолжительностью по 100 + 200 с с синтезом широкой полосы частот. Кроме этого в данном эксперименте были проведены работы по оборудованию радиотелескопа РТ-70 интерферометрическим приёмным трактом диапазоне $\lambda = 5,4$ см и опробованию его в автономном режиме. Результаты эксперимента в настоящее время обрабатываются.

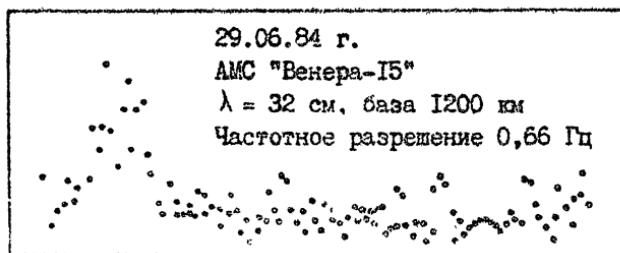


Рис. 3.11. Интерферометрия искусственного объекта вблизи от Солнца

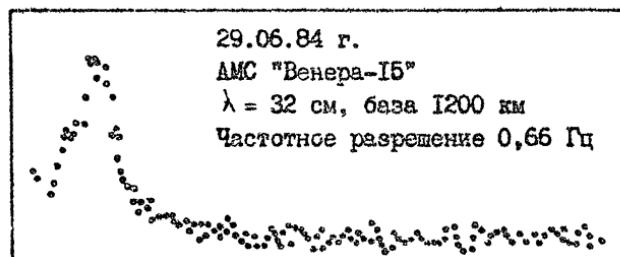


Рис. 3.12. Интерферометрия искусственного объекта вблизи от Солнца; результат некогерентного накопления сигнала за 200 с

В апреле 1985 года на той же базовой линии состоялся ещё один РСЛБ-эксперимент в развитие программы интерферометрии АМС. Основной задачей эксперимента являлось проведение цикла наблюдений радиоизлу-

чения бортового передатчика АМС "Вега-2" в диапазоне длин волн $\lambda = 32$ см с целью точного определения участка траектории станции на небе на фоне удаленных космических радиоисточников. Вторая задача заключалась в проведении пробных (с радиотелескопом РТ-70) радиоинтерферометрических наблюдений космических источников в диапазоне $\lambda = 5,4$ см.

Наблюдения АМС "Вега-2", находившейся на пути к Венере, проводились 10.04.85 в течение двух часов. За это время было сделано 8 сеансов магнитной записи её сигналов длительностью от 200 до 350 секунд каждый. До проведения этого цикла и сразу после его окончания проведено несколько сеансов магнитной записи источников ЗС 454.3, ЗС 286 и ЗС 273 с целью задания отсчетной системы координат для определения в ней положения АМС. На рис. 3.13 приведён пример спектра интерференционного сигнала, полученного от межпланетной станции. В сантиметровом диапазоне длин волн 09.04.85 и 12.04.85 было проведено в общей сложности 11 сеансов магнитной записи сигналов источников Р 2I34, ЗС 84, ЗС 454.3 и ЗС 380 длительностью по 100 с.

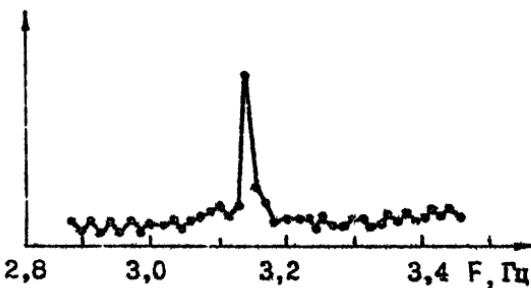


Рис. 3.13. Интерферометрия АМС "Вега-2", $\lambda = 32$ см,
база 1200 км, частотное разрешение на спектрограмме
 $0,015$ Гц

Результаты апрельского эксперимента в настоящее время обрабатываются.

Эксперименты 1979–1985 гг. в целом показали работоспособность аппаратурного комплекса РСДБ НИРФИ, правильность заложенных в него технических принципов. Получен обширный материал для отработки методики решения задач астрометрии и пространственно-временной привязки раз-

несоcных не большие расстояния пунктов, а также - для исследования структуры космических радиоисточников при различном угловом разрешении в двух диапазонах длин волн. В техническом плане эксперименты подтвердили правильность заложенных в аппаратурном комплексе интерферометра технических решений /9-21/ и позволили довести интерферометр до уровня рабочего инструмента, а участники их приобрели ценный опыт работ.

Л и т е р а т у р а

1. Алексеев В.А., Липатов Б.Н., Щекотов В.В. - Изв. вузов - Радиофизика, 1976, т. 19, № 1, с. 1669.
2. Губанов В.С., Финкельштейн А.И., Фридман П.А. Введение в радиоастрономию. - М.: Наука, 1983.
3. Колесов М.А., Арманд Н.А., Яковлев О.И. Распространение радиоволн при космической связи. - М.: Мир, 1969.
4. Алексеев В.А., Гайкович К.П., Наумов А.П. XIII Всесоюзная конференция по распространению радиоволн. - М.: Наука, 1981. Тезисы докладов.
5. A.N.Argue, C.de Vegt, E.Elsamere et al. - Astronomy and Astrophysics, 130, 191 - 199 (1984).
6. Клемперер К.К. - В сб.: Частота и время. - М.: Мир, 1973.
7. Козлов А. - Наука и жизнь, 1982, № 3, с. 2.
8. Яковлев О.И. Распространение радиоволн в солнечной системе. - М.: Сов. радио, 1974.
9. Алексеев В.А., Гатажок Э.Д., Никонов В.Н. Тезисы докладов XI Всесоюзной радиоастрономической конференции по антеннам, аппаратуре и методам, Арм. ССР, Ереван, 1978, с. 208.
10. Липатов Б.Н., Сизов А.С. - Там же, с. 224.
11. Живоря П.С., Липатов Б.Н. - Там же, с. 225.
12. Дементьев А.Ф., Нязев Н.А., Кроков А.Е. - Там же, с. 227.
13. Алексеев В.А., Кроков А.Е., Липатов Б.Н., Сизов А.С. - В кн.: Радиоастрономическая аппаратура, антенны и методы. - АН Арм. ССР, Ереван, 1982, с. 412.
14. Алексеев В.А. и др. - Там же, с. 414.
15. Липатов Б.Н., Сизов А.С. - Там же, с. 416.
16. Липатов Б.Н., Сизов А.С. - Там же, с. 417.
17. Липатов Б.Н., Сизов А.С. - Там же, с. 419.

18. Гаталок Э.Д., Князев Н.А., Янкавичев М.В. - Там же, с. 423.
19. Дементьев А.Ф., Крюков А.Е. - Там же, с. 425.
20. Липатов Б.Н., Матвеев Л.Г., Сизов А.С. - Там же, с. 427.
21. Алексеев В.А., Крюков А.Е., Липатов Е.Н., Сизов А.С. - Изв.вузов,
- Радиофизика, 1983, т. 26, № II.

Дата поступления в статье
9 декабря 1985 г.

Валерий Александрович Алексеев
Александр Анатольевич Антиленко
Эдуард Дмитриевич Гатэлук
Александр Федорович Дементьев
Николай Анатольевич Князев
Андрей Евгеньевич Крюков
Борис Николаевич Липатов
Руфина Николаевна Рат
Александр Сергеевич Сизов

РАДИОАСТРОМЕТРИЧЕСКИЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР НИРФИ

Подписано в печать 30.12.85 г. МЦ 00604. Формат 60 x 84 / 16.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Объем 3.31 усл. печ. л.
Тираж 120. Заказ 4947. Бесплатно.
