

Министерство образования Российской Федерации
Научно-исследовательский радиофизический институт
(НИРФИ)

Кафедра радиоастрономии и распространения радиоволн
радиофизического факультета ННГУ

Препринт N 462

Радиоинтерферометр

(Методическая разработка для студентов магистратуры
радиофизического факультета ННГУ)

В. П. Докучаев
Н. А. Дугин
В. А. Разин

Нижний Новгород
2000

УДК 523.164.

Докучаев В. П., Дугин Н. А., Разин В. А.

Радиоинтерферометр: описание лабораторной работы по радиоастрономии для учащихся магистратуры радиофизического факультета ННГУ // Препринт №462 — Нижний Новгород: НИРФИ, 2000. 32 с.

Приведено краткое изложение основ теории двухантенных интерферометров.

Дано описание двухантенного интерферометра в радиоастрономической обсерватории НИРФИ “Старая Пустынь”. Радиоинтерферометр состоит из двух антенн с параболическими рефлексорами диаметром 14 метров, корреляционного радиометра на частоту 152 МГц, системы калибровки фазы сигналов в приемных трактах, блоков дистанционного управления радиоинтерферометром, регистрирующих устройств.

Изложено содержание заданий по лабораторной работе радиоастрономического характера, подлежащих выполнению на базе интерферометра в “Старой Пустыни”.

Лабораторная работа выполняется в рамках программы специализации студентов дневного отделения и магистратуры радиофизического факультета по радиоастрономии на кафедре радиоастрономии и распространения радиоволн.

Работа выполнена в рамках проекта №570 — Учебно-научный центр “Фундаментальная радиофизика”, направление 2.1: Развитие и поддержка системы совместных учебно-научных центров, филиалов университетов и кафедр университетов и гранта РФФИ №00-15-96591 — Ведущая научная школа “Галактическая и внегалактическая радиоастрономия. Межзвездная среда”.

Рецензенты:

доктор физ.-мат. наук, профессор Кисляков А. Г.

кандидат физ.-мат. наук, зав. отделом НИРФИ Токарев Ю. В.

© Научно-исследовательский радиофизический институт (НИРФИ)

1. ВВЕДЕНИЕ

Антенна, направленная на внеземной радиоисточник, угловые размеры которого много меньше раствора её главного луча, улавливает не только излучение источника, но и распределенное по небу неоднородное фоновое излучение (на дециметровых и метровых волнах — преимущественно радиоизлучение Галактики). По этой причине для исследования излучения источника, его пространственной структуры необходимы методы, позволяющие отделить радиоизлучение изучаемого объекта от фонового, создаваемого всеми другими источниками. Очевидно, для этого необходимы антенны с высокой разрешающей способностью. Требования к разрешающей способности антенны в зависимости от назначения радиотелескопов весьма разнообразны: от градусов до тысячных и миллионных долей угловой секунды.

Антенна со сплошной апертурой, имеющей линейный размер D , на волне длиной λ обеспечивает разрешение λ/D радиана. Отсюда следует, что для получения разрешения, например, $\sim 1'$ дуги необходимо иметь антенну с $D \sim 3500\lambda$. На волне $\lambda = 1$ м это составляет 3,5 км. Ясно, что создание таких антенн представляет громадные технические трудности. Поэтому для получения высоких угловых разрешений создаются различные антенные системы с незаполненной апертурой. Простейшей такой системой, имеющей фундаментальное значение в радиоастрономии, является двухантенный радиоинтерферометр [1–3], изучению которого и посвящена настоящая лабораторная работа.

Схема интерферометра изображена на рис. 1. Здесь B — расстояние между антеннами A_1 и A_2 (длина базы интерферометра), l_1 и l_2 — электрические длины кабелей от антенны до точки их соединения O . Примем, что антенны одинаковы, характеризуются диаграммами направленности по напряжению $F(A, h)$ с максимумами при $A = A_0$, $h = h_0$ (A — азимут,

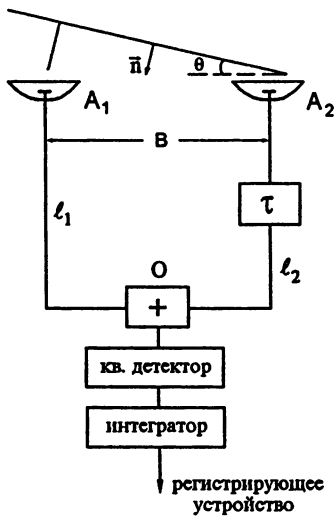


Рис.1. Блок-схема простейшего радиоинтерферометра.

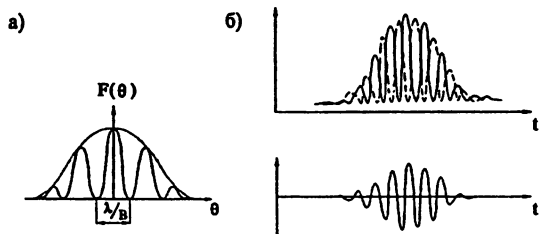


Рис.2. а) Диаграмма направленности интерферометра, б) с переключением фазы.

h — угол места), а принимаемое радиоизлучение от точечного источника представляет собой плоскую монохроматическую волну, падающую под углом θ к направлению, перпендикулярному базе интерферометра. Напряжение на входе приемника (в точке O) пропорционально

$$V = F(A, h)[\cos(\omega t - k\ell_1) + \cos(\omega t - k\ell_2 - kB \sin \theta)],$$

где ω — круговая частота, $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число. Напряжение на выходе квадратичного детектора (приемник реагирует на мощность сигнала) пропорционально средней по времени величине квадрата напряжения

$$V^2 = F^2(A, h)(1 + \cos[k(\ell_1 - \ell_2) + kB \sin \theta]). \quad (1)$$

Из выражения (1) следует, что при $kB \gg 1$ в пределах первичной диаграммы направленности антенн имеется большое число интерференционных максимумов и минимумов, т. е. диаграмма направленности интерферометра многолепестковая (рис. 2а). Угловая ширина одного лепестка (угол между двумя соседними максимумами или минимумами)

$$\Delta\theta = \frac{\lambda}{B \cos \theta}. \quad (2)$$

При $\theta = 0^\circ$ и $B = 100\lambda$ разрешение $\Delta\theta = 34',4$. Если база интерферометра ориентирована приблизительно в направлении Восток–Запад, а наблюдения за источником проводятся вблизи меридиана ($\theta \sim 0^\circ$), угол θ меняется из-за вращения Земли вокруг оси приблизительно пропорционально времени. При этих условиях приемник регистрирует интерференционную картину, анализ которой довольно прост с точки зрения определения координат источника или измерения ориентации и длины базы интерферометра. Параметрами интерференционной картины, подлежащими определению, являются её амплитуда, частота и фаза.

Рассмотренная схема интерферометра основана на сложении сигналов от двух антенн, поэтому такой интерферометр называется аддитивным. Существенный его недостаток связан с тем, что интерференционная картина искажается из-за регистрации “постоянной составляющей” сигнала, в то время, как важна только его интерференционная часть. Этот недостаток можно устранить, модулируя с некоторой частотой $f_{\text{мод}}$ (несколько десятков герц) разность длин кабелей $l_1 - l_2$ от 0 до $\lambda/2$ и регистрируя сигнал на частоте модуляции $f_{\text{мод}}$. При такой модуляции интерференционная картина периодически смещается на половину лепестка (рис. 2б), так что максимумы замещаются на минимумы и наоборот. В результате “постоянная составляющая” сигнала исключается. Действительно, имеем

$$\begin{aligned}\overline{V_+^2} &= \overline{(V_1 + V_2)^2}, \\ \overline{V_-^2} &= \overline{(V_1 - V_2)^2}.\end{aligned}$$

Разность сигналов, которую регистрирует приемник, равна

$$\overline{V_+^2} - \overline{V_-^2} = 4\overline{V_1 V_2}. \quad (3)$$

Из выражения (3) очевидно, что для получения интерференционной картины целесообразно сигналы от двух антенн перемножать. Такие интерферометры называются мультипликативными или корреляционными. В настоящее время корреляционные интерферометры получили самое широкое применение в радиоастрономии.

Выше предполагалось, что антенны принимают монохроматическую волну от точечного источника. В действительности, однако, всегда приходится иметь дело с некогерентными волнами и протяженными источниками. Кроме того, сами антенны имеют конечные размеры и могут отличаться друг от друга. Всё это приводит к уменьшению видимости интерференционной картины, определяемой выражением

$$M = \frac{I_{\text{max}} - I_{\text{min}}}{I_{\text{max}} + I_{\text{min}}}, \quad (4)$$

где I_{\max} и I_{\min} — интенсивности сигналов соответственно в максимумах и минимумах интерференционной картины.

Рассмотрим сначала влияние протяженности источника на величину M . Протяженный источник можно рассматривать как совокупность независимых (некогерентных) точечных источников. Каждый источник создает интерференционную картину с определенной фазой. Складывая отдельные такие интерференционные картины (точечные источники некогерентны), мы получим интерференционный сигнал от протяженного радиоисточника.

Вычисления показывают [4, 5], что источник в виде полоски с угловой шириной $\theta_{\text{ист}}$ и равномерным распределением яркостной температуры дает интерференционную картину с

$$M = \frac{\sin\left(\pi \frac{\theta_{\text{ист}}}{\Delta\theta}\right)}{\pi \frac{\theta_{\text{ист}}}{\Delta\theta}}, \quad (5)$$

где $\Delta\theta$ — ширина интерференционного лепестка.

В случае диска радиуса R с равномерной яркостной температурой [5]

$$M = \frac{\Delta\theta}{\pi R} J_1\left(\frac{2\pi R}{\Delta\theta}\right), \quad (6)$$

$J_1(x)$ — функция Бесселя первого порядка. Из формул (5) и (6) видно, что M обращается в нуль при некоторых отношениях $\theta_{\text{ист}}/\Delta\theta$ и $R/\Delta\theta$. Для источника в виде полоски интерференционная картина исчезает первый раз при $\theta_{\text{ист}} = \Delta\theta$, а в случае диска — при $2R = 1,22\Delta\theta$. Таким способом с помощью интерферометра можно определять эффективные угловые размеры радиоисточников.

Выясним теперь, как влияет на видимость интерференционной картины ширина полосы пропускания аппаратуры. Для различных частот в пределах принимаемого спектрального интервала фазы интерференционных картин при одном и том же

угле падения волны θ оказываются разными. Вследствие этого уменьшается видимость интерференционной картины. Интегрируя интерференционный член в формуле (1) по волновому вектору $k = 2\pi/\lambda$ в пределах ширины полосы пропускания аппаратуры, нетрудно получить выражения для величины M . В случае П-образной частотной характеристики имеем ([5], см. также [6]):

$$M = \frac{\sin\left(\pi L \frac{2\Delta\omega}{\omega_0}\right)}{\pi L \frac{2\Delta\omega}{\omega_0}}, \quad (7)$$

где $L = B \sin \theta / \lambda_0$, λ_0 — длина волны, соответствующая центральной частоте ω_0 , $2\Delta\omega$ — ширина полосы пропускания приемника.

Из формулы (7) следует, что чем больше относительная разность хода интерферирующих волн L и относительная ширина полосы пропускания $2\Delta\omega/\omega_0$, тем хуже видна интерференционная картина. Это легко понять. Степень когерентности волн, принимаемых антеннами, тем больше, чем меньше разность хода по сравнению с длиной цуга волны, определяемой отношением $2\Delta\omega/\omega_0$. Чем меньше это отношение, тем больше длина цуга волн и тем отчетливее интерференционная картина при данной разности хода L .

Замечание 1. К анализу интерференционных (и дифракционных) явлений в случае протяженных источников можно подойти иначе. Рассмотрим поля, создаваемые протяженным источником, в точках P_1 и P_2 , в которых расположены антенны интерферометра. Как определить, когерентны поля в этих точках или нет? В критерий когерентности в данном случае входит разность разностей хода от различных точек источника до точек P_1 и P_2 и длина волны [5, 7]. Если ψ — угловой размер источника, а B — длина базы интерферометра, то колебания, принимаемые отдельными антеннами, когерентны (отчетливо видна интерференционная картина) при $\psi B \ll \lambda$. При

$\psi B \gg \lambda$ интерференционная картина практически исчезает. Это и дает возможность выделить излучение источников, для которых $\psi B \ll \lambda$ на фоне излучения источников с большими угловыми размерами, для которых $\psi B \gg \lambda$.

Замечание 2. Интерферометрические наблюдения позволяют определить распределение радиояркости в протяженных источниках. Поясним это на простом примере источника с одномерным симметричным распределением яркости $f(\theta)$ и сравнительно малым угловым размером $\theta_{\text{ист}}$, так что при $\theta < \theta_{\text{ист}}$ $\sin \theta \sim \theta$. Сигнал на выходе корреляционного интерферометра при наблюдении такого источника будет пропорционален

$$P = \int \cos \left(2\pi \frac{B\theta}{\lambda} \right) f(\theta) d\theta. \quad (8)$$

Формула (8) показывает, что сигнал на выходе интерферометра пропорционален амплитуде компоненты Фурье с пространственной частотой B/λ в распределении яркости по источнику. Последовательные наблюдения источника при различных значениях пространственной частоты B/λ дают возможность приближенно определить преобразование Фурье распределения яркости в источнике, а затем посредством обратного преобразования Фурье получить картину распределения яркости в источнике с разрешением, отвечающим максимальной длине базы интерферометра. Таким образом, интерферометр с длиной базы B на волне λ можно рассматривать как фильтр пространственных частот с узкой полосой пропускания на центральной частоте B/λ (полоса пропускания конечна из-за конечных размеров антенн). Имеется глубокая спектральная аналогия между двухантенным интерферометром с переменной базой и резонансным перестраиваемым контуром в приемнике [8]. Спектральный подход к анализу работы интерферометров позволил создать теорию сложных глобальных систем апертурного синтеза, осуществить их на практике и получить уникальные данные о структуре космических радионисточников [1–3, 9].

2. СВЕДЕНИЯ, НЕОБХОДИМЫЕ ДЛЯ РАБОТЫ С РАДИОИНТЕРФЕРОМЕТРОМ В РАДИОАСТРОНОМИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ “СТАРАЯ ПУСТЫНЬ”

2.1. ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ

Для проведения эксперимента, обработки данных и получения результатов необходимо знать ряд основных интерферометрических и астрономических соотношений и величин [10].

Для малобазовых интерферометров удобно вести рассмотрение в декартовой системе координат, привязанной к антеннам интерферометра: начало координат в точке пересечения осей восточной антенны, ось x направлена на юг, ось y — на восток, ось z — в зенит. Проекции базы X, Y, Z могут быть определены геодезическими методами, что важно для контроля результатов радиоастрономических наблюдений. При работе по космическим источникам удобно вести рассмотрение для параметров базы:

$$\begin{aligned}L &= Z \sin \varphi_{\text{п}} - X \cos \varphi_{\text{п}}, \\M &= Z \cos \varphi_{\text{п}} + X \sin \varphi_{\text{п}}, \\N &= Y\end{aligned}\tag{9}$$

в системе координат, повернутой относительно оси y на угол $\varphi_{\text{п}}$ (широта места), то есть ось L направлена на Полюс Мира. В этом случае разность фаз, измеряемая интерферометром, будет определяться следующим наиболее простым выражением:

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_{\text{инт}} + k(L \sin \delta + M \cos \delta \cos t + N \cos \delta \sin t),\tag{10}$$

где δ, t — склонение и часовой угол источника излучения, $\Delta\varphi_{\text{инт}}$ — неконтролируемая системой внутренней фазовой калибровки разность длин приемных трактов, $k = 2\pi/\lambda$, λ — длина волны.

Задержка сигнала ΔD в метрах для одной из антенн определяется как

$$\Delta D [\text{м}] = L \sin \delta + \cos \delta (M \cos t + N \sin t), \quad (11)$$

или в дискретах фазовращателя (5 нс) для нашего конкретного инструмента:

$$\Delta D_{\text{дискр}} = \frac{2}{3} \Delta D [\text{м}]. \quad (12)$$

Период интерференционной картины в минутах декретного времени

$$T_{\text{п}} = \frac{720\lambda}{\pi \cos \delta (N \cos t - M \sin t)(1 + \mu)}. \quad (13)$$

Астрономическая постоянная $\mu = 0,00273791$.

Часовой угол источника во временной мере равен

$$t = (T - T_{\text{кульм}})(1 + \mu), \quad (14)$$

где T — текущее декретное время, а $T_{\text{кульм}}$ — время верхней кульминации источника для часового пояса радиоастрономической обсерватории (РАО) “Старая Пустынь”.

$$T_{\text{кульм}} = 3^{\text{h}} + \frac{1}{1 + \mu} (\alpha - S_0 - \lambda_{\text{п}}), \quad (15)$$

здесь α — прямое восхождение источника, $\lambda_{\text{п}}$ — долгота места, S_0 — звездное время на данные сутки (берется из Астрономического Ежегодника (АЕ)).

Азимут A и высота h источника в горизонтальной системе координат рассчитываются из соотношений

$$\begin{aligned} \cos h \sin A &= \cos \delta \sin t, \\ \sin h &= \sin \delta \sin \varphi_{\text{п}} + \cos \delta \sin \varphi_{\text{п}} \cos t, \\ \cos h \cos A &= -\sin \delta \cos \varphi_{\text{п}} + \cos \delta \sin \varphi_{\text{п}} \cos t. \end{aligned} \quad (16)$$

Источники, для которых $\delta > 90^\circ - \varphi_{\text{п}}$, являются незаходящими и имеют верхнюю и нижнюю кульминации. Высота источника определяется как

$$h = 90^\circ + \delta - \varphi_{\text{п}} \text{ для верхней кульминации к югу от зенита,}$$

$$h = 90^\circ - \delta + \varphi_{\text{п}} \text{ для верхней кульминации к северу от зенита,}$$

$$h = -90^\circ + \delta + \varphi_{\text{п}} \text{ для нижней кульминации.}$$

Время восхода и захода источников определяется по соотношению

$$\cos t = -\operatorname{tg} \delta \operatorname{tg} \varphi_{\text{п}}, \quad (17)$$

которое имеет два решения. Пересчет к декретному времени ведется по соотношениям (14), (15).

Географические координаты РАО "Старая Пустынь"

$$\begin{aligned} \text{долгота } \lambda_{\text{п}} &= 2^{\text{h}} 54^{\text{m}} 31^{\text{s}} \\ \text{широта } \varphi_{\text{п}} &= 55^\circ 39' 07''. \end{aligned}$$

Параметры базы интерферометра

$$\begin{aligned} X &= 2,55 \text{ м} & L &= -0,052 \text{ м} \\ Y &= 60,01 \text{ м} & M &= 3,053 \text{ м} \\ Z &= 1,68 \text{ м} & N &= 60,01 \text{ м} \end{aligned}$$

Координаты радионисточников на эпоху 1999.0 и плотности потоков на частоте 150 МГц:

Таблица 1

Название	Прямое восхождение α (h, m, s)	Склонение δ (°, ', ")	S_{ν} (Ян)
Лебедь-А	19 59 26	40 43 47	10500
Кассиопея-А	23 23 25	58 48 51	9660
Телец-А	5 34 28	22 01 18	1430
Дева-А	12 30 46	12 23 49	1200

Координаты Солнца на данную дату берутся из АЕ.

2.2. ЗАДАНИЕ, ВЫПОЛНЯЕМОЕ ДО ЭКСПЕРИМЕНТА

На дату проведения экспериментальных работ на РАО, используя приведенные выше соотношения,

- а) рассчитать время кульминации четырех радиосточников (табл. 1),
- б) составить график наблюдения пар (Лебедь-А — радиосточник) при $T_{\text{н}}$ каждого менее 15 минут;
- в) рассчитать задержки для предполагаемых моментов наблюдения;
- г) рассчитать координаты A и h для предполагаемых моментов наблюдения всех источников.

3. ОПИСАНИЕ РАДИОИНТЕРФЕРОМЕТРА РТ14-1 – РТ14-2

3.1. СОСТАВ И СТРУКТУРА

Радиоинтерферометр метрового диапазона с постоянной базой является составным элементом трехантенной системы апертурного синтеза (САС), осуществляющей суперсинтез большой апертуры с передвижением одного телескопа РТП-14 по линии Восток–Запад (подвижная антенна в лабораторной работе не используется). Назначение САС — исследование распределенного линейно-поляризованного космического радиоизлучения и дискретных радиосточников большой протяженности со сложной структурой и слабопеременной интенсивностью. На рис. 3 приведена общая схема двухэлементного радиоинтерферометра.

В табл. 2 приведены основные параметры САС.

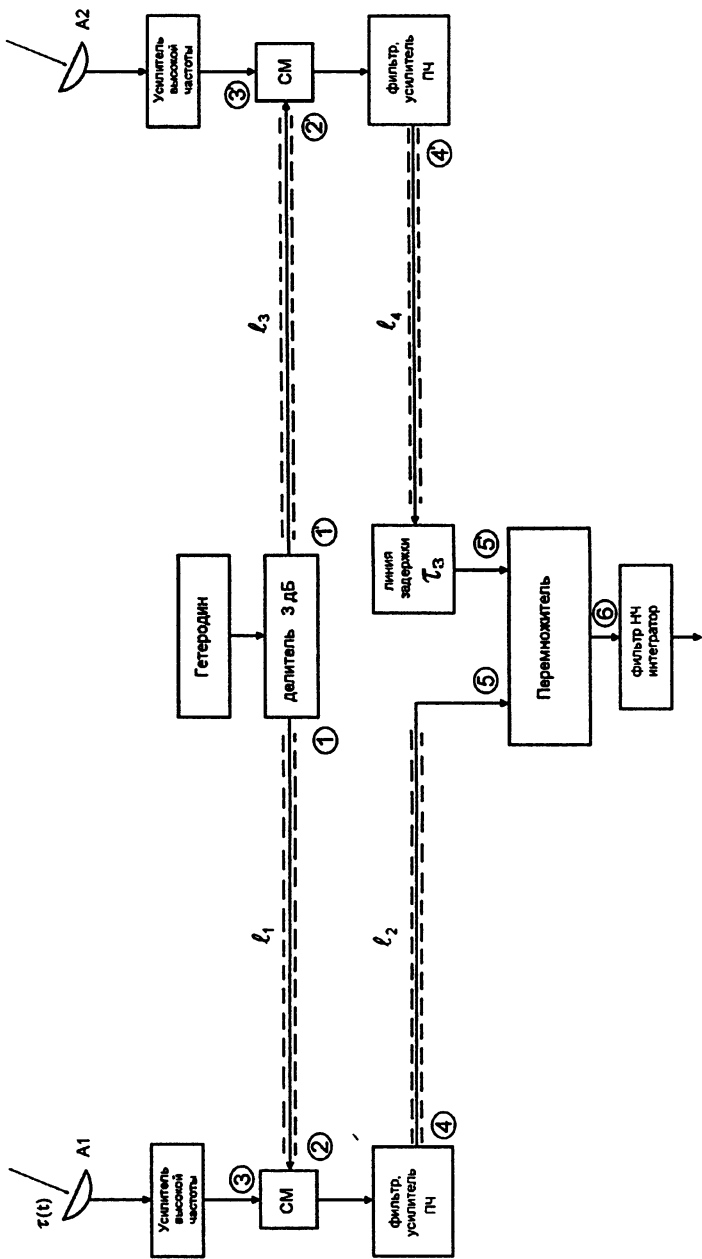


Рис. 3. Схема радиинтерферометра

Таблица 2

Наименование основных соотношений	Основные соотношения	Параметры
1	2	3
1. База интерферометра Ориентация	(B) переменная	130 м Восток – Запад
2. Рабочая частота	f	152 МГц
3. Диаметр зеркал антенн	D	14 м
4. Коэффициент использования поверхности Эффективная площадь единичного радиотелескопа	КИП $\sim 0,5$ $\sigma_{\text{эфф}} = \text{КИП } \sigma_{\text{геом}}$	98 м ²
5. Температура шумов приемной системы	$T_{\text{сист}} = T_{\text{ант}} +$ $+ T_{\text{фид}} + T_{\text{прием}}$	900 К
6. Ширина полосы пропускания приемника	Δf	1–4 МГц
7. Чувствительность по антенной температуре	$\Delta T_{\text{а}} = \frac{T_{\text{сист}}}{\sqrt{\tau} \Delta f}$	0,7 К ($\tau = 1\text{с}$, $\Delta f = 2 \text{ МГц}$)
8. Стабильность частоты гетеродина (при $\delta\varphi \sim 0^\circ,5$)	$\frac{\delta f}{f} = \frac{10^{-2}\lambda}{2\pi B_{\text{max}}}$	$2 \cdot 10^{-5}$
9. Среднеквадратичные флуктуации фазы из-за неточного знания фарадеевского вращения при ($\chi_{\text{н}}$ — угол поворота плоскости поляризации в ионосфере)	$2\sqrt{\Delta\chi_{\text{н}}^2} < 0,4$	$< 20^\circ$

Таблица 2 (продолжение)

1	2	3
10. Точность калибровки фазы в каналах	$\delta\varphi$	$2^\circ - 3^\circ$
11. Среднеквадратичная ошибка (СКО) определения фазы по радиосточнику		5°
12. Эквивалентная СКО определения координат радиосточника		$45''$
13. Допустимая СКО сопровождения (0,05 полуширины гл. лепестка)	$\sigma_\theta = 6 \cdot 10^{-2} \frac{\lambda}{D}$	$30'$
Ошибка сопровождения антенн от пультов (паспортная)		$10'$
14. Максимальная временная задержка	$\tau_{B_{\max}} < \frac{B_{\max}}{c}$	$0,45 \text{ мкс}$
15. Минимальный дискрет временной задержки		5 нс
16. Период интерференционных полос (угловая скорость вращения Земли $\omega_3 = 7,272 \cdot 10^{-5} \frac{\text{рад}}{\text{эв.сек}}$)	$T_{\Pi} = \frac{\lambda}{B\omega_3} \sec \delta_0 \sec t_0$	
17. Минимальный период интерференционных полос	$T_{\Pi_{\min}} = \frac{\lambda}{B\omega_3}$	3 мин

Технические характеристики антенной системы интерферометра:

- 1) антенны — параболоиды вращения с диаметром зеркал 14 метров, полноповоротные с азимутально-угломестной монтировкой;
- 2) облучение однозеркальное;
- 3) базовое расстояние 60 метров;
- 4) ориентация базы 87° (близко к направлению Восток–Запад);
- 5) управление ручное и автоматическое;
- 6) технологическое здание центрального пункта (ЦП) расположено между антеннами; линии связи ВЧ — кабельные длиной от 60-ти до 120-ти метров.

Состав приемной аппаратуры (рис. 4, 5):

- 1) корреляционный радиометр с квадратурным выходом;
- 2) система фазовой калибровки, обеспечивающая контроль разности электрических длин (фаз) передающих ВЧ-трактов интерферометра с точностью $2^\circ - 3^\circ$; является важнейшей составной частью аппаратуры при проведении прецизионных фазовых измерений;
- 3) кабельные линии связи антенных пунктов с ЦП для передачи ВЧ и сигналов управления антеннами и аппаратурой;
- 4) ЭВМ РС АТ 386 с интерфейсом на основе аппаратуры КАМАК;
- 5) система автоматического управления (САУ) антеннами и блоки дистанционного включения аппаратуры антенных пунктов.

Корреляционный радиометр — супергетеродинный приемник с двойным преобразованием частоты, выполненный по одно-двухполосной (ОП-ДП) схеме с переключением фазы [2], позволяющей сочетать положительные свойства ОП и ДП приемников, а именно, облегчение фазовых операций при ОП-приеме и более простая реализация линий задержки (ЛЗ) и коррелятора для ДП-приема.

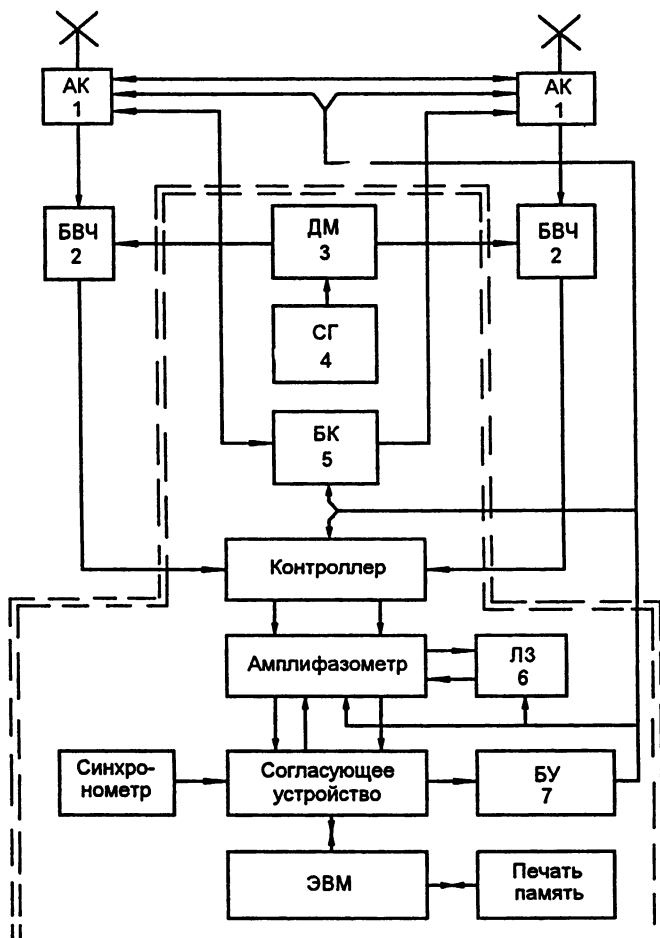


Рис. 4. Блок-схема приемной аппаратуры радиоинтерферометра.
 1 — антенные коммутаторы; 2 — блоки высокой частоты; 3 — делитель мощности гетеродина; 4 — синхронизованный гетеродин 197 МГц; 5 — блок калибровки; 6 — линия задержки; 7 — блок управления режимами работы.

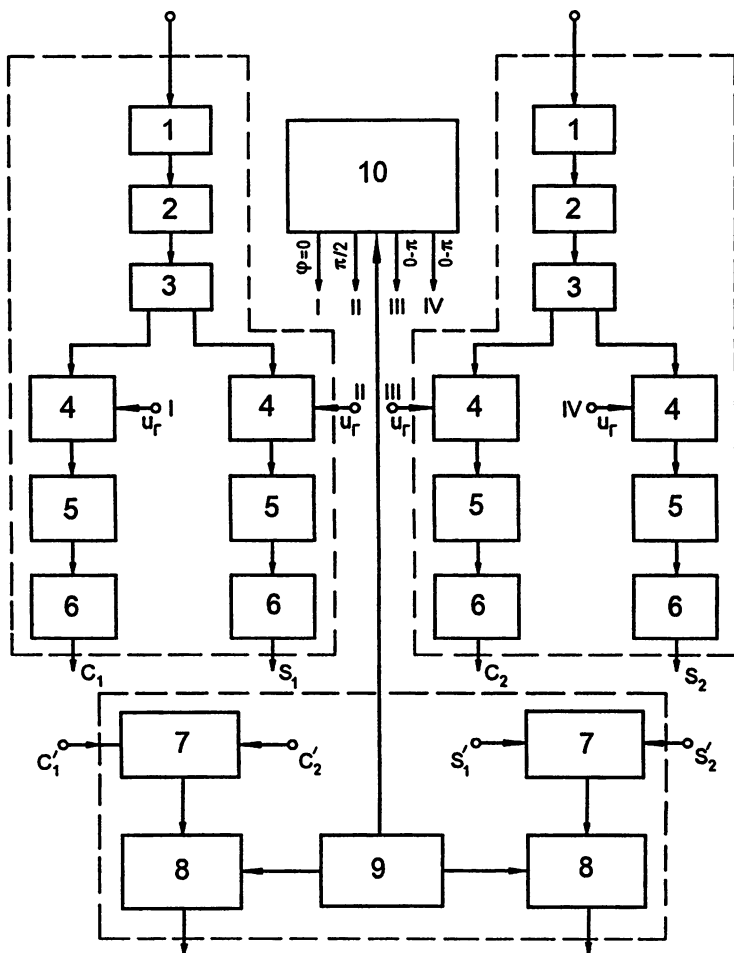


Рис. 5. Блок-схема амплифазометра (коррелятора).

1 — аттенюаторы 0–30 дБ; 2 — транзисторные УПЧ (45 МГц); 3 — разветвители; 4 — смесители; 5 — фильтры нижних частот 0–2 МГц; 6 — эмиттерные повторители; 7 — перемножители; 8 — гетеродинные фильтры; 9 — генератор опорных сигналов; 10 — гетеродин 45 МГц.

Основные субблоки радиометра:

- 1) первый гетеродин имеет рабочую частоту 197 МГц, которая формируется синтезатором частоты Ч6-31 (49,25 МГц) и умножителями частоты У2-6 ($\times 4$) после делителя мощности на два антенных канала;
- 2) фазовый модулятор с блоком питания;
- 3) ВЧ-блоки на антенных пунктах, имеющие ВЧ-фильтры, усилители высокой частоты (УВЧ), смесители, предварительные усилители промежуточной частоты (ПУПЧ);
- 4) блок УПЧ (двухканальный);
- 5) второй гетеродин с рабочей частотой 45 МГц (синтезатор частоты Ч6-31);
- 6) блок второго преобразователя преобразует сигналы ПЧ в нулевую, производит фазовую модуляцию сигнала $0-\pi$, сдвигает сигналы по фазе на $\pi/2$ (образование SIN- и COS-каналов), а также фильтрует сигналы в полосе до 2 МГц;
- 7) блок ступенчатой модуляции (фазовращатель) производит непрерывную модуляцию фазы второго гетеродина с дискретом 45° ;
- 8) блок перемножителей (коррелятор) служит для усиления и перемножения различных комбинаций сигналов приемника;
- 9) блоки линий задержки;
- 10) блоки гетеродинных фильтров;
- 11) регистрирующие устройства (самописцы и ЭВМ);
- 12) синхронизатор Ч7-15 для контроля точного времени.

3.2. ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

а) Объектами исследования в ходе проведения лабораторной работы будут наиболее мощные радионисточники Солнце, Кассиопея-А, Лебедь-А, Телец-А, Дева-А. Интенсивность излучения каждого из них такова, что отношение сигнал/шум на выходе коррелятора (> 10) позволяет проводить “визуальное” наблюдение и простейшую обработку на ленте самописца без длительной и сложной процедуры накопления сигнала на ЭВМ. По записи интерференционной картины от источника проводится определение его интенсивности относительно опорного источника (в данном случае Лебедь-А), оценка активности Солнца и сдвига центра тяжести его излучения, определение разности фаз передающих трактов (внешняя калибровка) по точкам с хорошо определяемой фазой, определение средней полуширины диаграммы направленности (ДН) антенн.

б) Методика измерений сигнала от радионисточника — на прохождение объекта через ДН неподвижных антенн. Для осуществления этой процедуры необходимо рассчитать координаты источника наперед заданное время, выставить антенны в упреждающую точку, рассчитать задержку и выставить её на блоке ЛЗ, провести запись сигнала на самописце от начала вхождения источника в ДН до его выхода из нее с нанесением меток времени.

в) Обработка результатов.

Результатом первичной обработки записи сигнала на ленте самописца являются: период интерференционной картины T_{π} , амплитуды синусоидальных кривых (интерферограмм) и амплитуды соответствующих калибровочных сигналов, моменты равенства фазы интерферограмм 0 и π (переходы через нуль), моменты времени спада амплитуды записи до значения $0,5$ от

максимума. По этим данным определяются: отношение интенсивностей (радиоисточник/Лебедь-А), разность фаз трактов, центр тяжести излучения Солнца, полуширина средней ДН.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Задание 4.1. Техника безопасности при проведении лабораторной работы

Ознакомиться с правилами по технике безопасности при работе на установках с напряжением до 1000 В и работах на высоте (на антеннах РТ-14) по инструкциям для РАО “Ст. Пустынь”.

Задание 4.2. Включение и выключение аппаратуры, контроль за её состоянием

Аппаратура интерферометра расположена в трех пунктах: ВЧ блоки с коммутационными блоками системы фазовой калибровки находятся в технологических кабинах телескопов РТ14-1 и РТ14-2, основная часть — в зале ЦП.

Приемная аппаратура в зале ЦП конструктивно размещена в пяти стойках, еще в трех стойках — блоки управления и приемники точного времени. Большая часть аппаратуры запитана от 10-ти КВт стабилизатора напряжения 220 В.

Порядок включения и контроля исправности:

Стойка 1:

— генератор прямоугольных импульсов ГЗ-15 (для работы фазового модулятора) — тумблер “сеть” в положение “вкл”;

— синтезатор частоты Ч6-31 (2 блока): “сеть” → “вкл”, стрелки индикаторных приборов на лицевых панелях блоков в средних положениях;

— умножители частоты У2-6 (2 блока): “сеть” → “вкл”, индикатор “выход” в среднем положении;

— генератор Г4-102 системы фазовой калибровки: “сеть” → “вкл”, кнопка “НГ” (непрерывная генерация) переключателя “род работы” в положение “выкл”.

Стойка 2:

— самописец КСП-04: тумблеры “канал 1” и “канал 2” в положение “вкл”, тумблер “диаграмма” включать после прогрева аппаратуры.

Стойка 3:

— синтезатор частоты Ч6-31 (2 блока) “сеть” → “вкл”;

— два составных блока питания для второго преобразователя, УПЧ, фазовращателя, перемножителей и блока фазовой калибровки (БФК) включаются тумблерами “сеть”; фазовращатель устанавливается в положение “работа”, при этом происходит переключение 8-ми неоновых индикаторов с периодичностью 7,5 секунд; кнопочный переключатель БФК устанавливается в положение “ГСС” (генератор стандартных сигналов).

Стойка 4 (линии задержки):

— включается общим тумблером “сеть”, загорается одна из неоновых ламп на блоке управления задержками.

Стойка 5 (6 блоков гетеродинных фильтров НЧ части радиометра):

— два составных блока питания включаются тумблерами “сеть”, отклоняются стрелки индикаторных приборов на лицевых панелях блоков гетеродинных фильтров.

Стойка 6 (сигнал точного времени):

— включается синхронизатор Ч7-15, точное время на синхронизаторе устанавливается по телевизионному приемнику сигнала точного времени в стойке 9.

Стойка 7 (интерфейс КАМАК):

— крейт КАМАК включается только при работающей ЭВМ.

Стойка 8 (пульты управления антеннами и блок дистанционного включения аппаратуры кабин телескопов):

— блок дистанционного управления включается тумблером “сеть”, приемная аппаратура на антеннах включается тумблерами “ВЧ блок РТ14-1” и “ВЧ блок РТ14-2”.

При выключении все действия выполняются в обратном порядке.

Задание 4.3. Калибровка интерферометра по монохроматическому сигналу генератора стандартных сигналов

Калибровка является важной частью работы большинства радиоастрономических инструментов. В интерферометрах есть несколько видов калибровки: общая калибровка усиления, усиления и сдвига фаз двух каналов, постоянства нулевых уровней каналов, а также фазовая калибровка — важнейшая часть эксперимента для получения прецизионных данных, основанных на высокоточном измерении разности фаз принимаемых антеннами сигналов.

В данной работе проводится калибровка усиления SIN- и COS-каналов приемника. Калибровочный сигнал от генератора Г4-102 с частотой 152 МГц подается через делители БФК на антенны на входы ВЧ-блоков приемника. Поскольку сигнал постоянен, то для получения интерференционной картины искусственно вводится дискретная фазовая задержка в один из антенных трактов. Фазовращатель имеет 8 положений от 0° до 315° с дискретом 45° и работает автоматически с периодом переключения фазы 7,5 секунд.

Порядок работы:

1) Включить лентопротяжный механизм самописца тумблером “диаграмма”.

2) Установить на блоке управления ЛЗ значение 200 нс восточной антенны (A_1) несколькими нажатиями кнопки “пуск” при положении “руч.” переключателя “ЭВМ-руч.-авт.” восточ-

ной антенны для компенсации разности электрических длин калибровочных трактов антенн.

3) Установить переключатель “НГ” генератора Г4-102 (стойка 2) в положение “вкл”, убедиться в наличии сигнала по отклонению обоих перьев самописца (SIN- и COS-каналы).

4) Провести измерение сигналов в течение 0,5–1 мин для определения величины выходов каналов — отклонение пера в обоих каналах должно быть порядка 0,4–0,5 ширины ленты. В случаях либо слишком сильного, либо слишком слабого сигнала в одном из каналов необходимо выровнять сигналы с выходов гетеродинных фильтров переключателями “усиление”, имеющими дискрет 5 дБ — это соответствует изменению величины сигнала в три раза. На этих же блоках расположены регуляторы “нуль” для смещения нулевых уровней выходных сигналов.

Провести запись сигналов в течение 3-х минут (3 периода “интерференционной картины”), сделать запись метки времени калибровки.

5) Амплитуды синусоидальных кривых двух каналов являются результатом калибровки и учитываются в конце сеанса наблюдений для коррекции амплитуд сигналов от радиисточников — приведения их к одному значению усиления приемника. Изменение отношения амплитуд сигналов в каналах со временем характеризует стабильность работы радиометра. Работа с двумя каналами повышает точность результата.

Задание 4.4. Проведение измерений сигналов от радиисточников

Порядок работы:

- 1) Провести калибровку по п.4.3.
- 2) Выключить сигнал калибровочного генератора кнопкой “НГ”.
- 3) Остановить фазовращатель в положении “0” тумблером “работа-стоп”.

4) Провести подготовку к наблюдению радиисточника Лебедь-А:

— рассчитать часовой угол источника на текущее время T по соотношениям (14), (15);

— определить период интерференционной картины T_{Π} по соотношению (13), интервал записи сигнала определен в 30 минут — время, за которое источник пройдет примерно половину ДН; если в этом интервале будет меньше $2T_{\Pi}$, то следует перейти к наблюдению другого источника;

— определить время $T_{\text{ср}}$ середины интервала наблюдения как

$$T_{\text{ср}} = T + \Delta T_{\text{уст}} + 15^{\text{м}},$$

где $\Delta T_{\text{уст}}$ зависит от скорости проводимых расчетов и установки антенн в упреждающую точку (порядка 15 минут);

— рассчитать для $T_{\text{ср}}$ часовой угол источника (14), задержку ΔD по соотношениям (11), (12) и координаты источника A и h в горизонтальной системе координат по соотношениям (16);

— установить задержку ΔD , рассчитанную по соотношению (12), на блоке ЛЗ;

— установить антенны РТ14-1 и РТ14-2 в расчетное положение для чего провести растормаживание приводов включением напряжения +24 В блоком Б5-8 и вращение ручными приводами до достижения нужного положения по показаниям сельсиндатчиков.

5) Произвести запись сигналов от источника, делая метки времени с интервалом в 1 мин, до момента времени ($T_{\text{ср}} + 15^{\text{м}}$), пример записи одного периода интерференционной картины дан на рис. 6.

6) Провести наблюдение по п.4.1–4.5 одного из радиисточников Кассиопея-А, Телец-А, Дева-А или Солнца по выбору в зависимости от их видимости над горизонтом.

В конце сеанса провести калибровку инструмента.

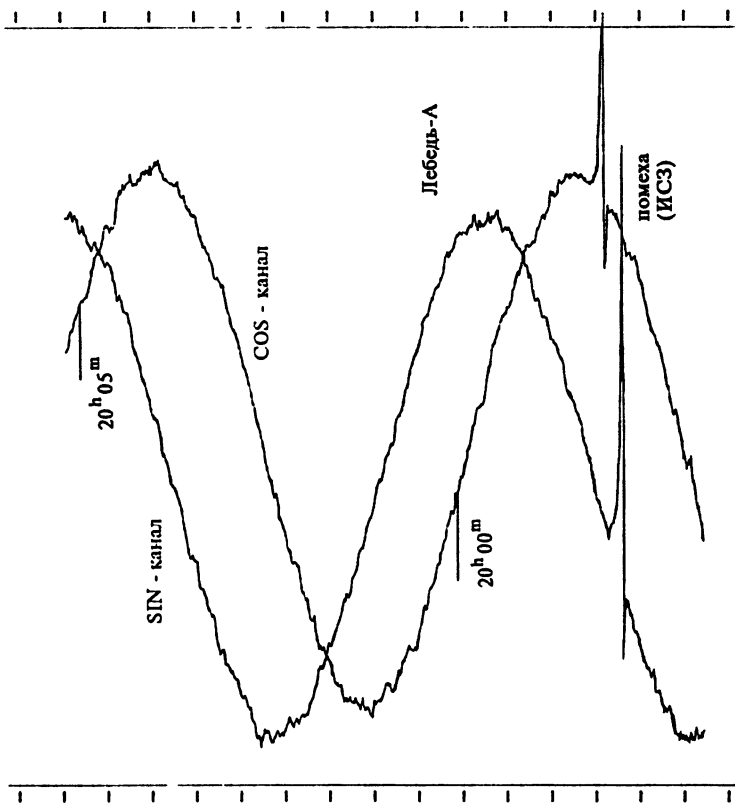


Рис. 6. Пример записи сигнала от радионисточника Лебедь-А на ленте самописца.

Задание 4.5. Обработка экспериментальных данных

1. Первичная обработка записей сигналов.

а) Определить среднее время каждой калибровки и амплитуды калибровочных сигналов.

б) Интерполировать по максимумам интерферограмм огибающие проведенных записей сигналов от радиоисточников, определить максимальные амплитуды и среднее время записей;

— определить нулевые уровни записанных синусоид и моменты времени при равенстве сигналов нулю (значения фазы 0 и π);

— определить моменты времени для значений огибающих, равных половине максимума (до и после максимума сигнала).

в) привести амплитуды сигналов к одному усилению радиометра, для чего: каждой записи источника поставить в соответствие среднее значение предыдущей и последующей калибровок; скорректировать все записи источников на изменение усиления, приняв за исходное значение амплитуду первой калибровки.

2. Получение результатов.

а) Получить отношения амплитуд (источник/Лебедь-А) из таблицы 1 и из экспериментальных данных, сравнить полученные результаты. Следует иметь в виду, что радиоисточник Каспиоя-А имеет так называемый “вековой ход” — непрерывное уменьшение потока со временем, около 1% в год на данной частоте; поэтому регулярные наблюдения этого источника повышают точность определения векового хода и его стабильность. Предполагается, что источник Телец-А также может иметь вековой ход.

б) По соотношениям (10), (13), (14) для моментов времени равенства фазы записанных сигналов от дискретных источников 0 и π рассчитать разность фаз и определить $\varphi_{\text{инт}}$ (внешняя калибровка). Определить среднее по всем замерам значение $\varphi_{\text{инт}}$ и его дисперсию.

Для Солнца проделать эту же операцию, считая $\varphi_{\text{инт}}$ известным; определить по остаточной разности фаз наличие смеще-

ния центра тяжести излучения Солнца и оценить это смещение, предполагая два варианта — смещение по координате t или δ .

в) Рассчитать координаты A и h антенн для моментов времени спада выходного сигнала до 0,5 максимума, определить полуширину средней ДН антенн. Определить её среднее и дисперсию.

ТРЕБОВАНИЯ К ОТЧЕТУ ИСПОЛНИТЕЛЯ О ПРОДЕЛАННОЙ РАБОТЕ

Отчет должен содержать таблицу расчетов координат источников и вводимых задержек на моменты времени проведения измерений, ленту самописца с записью калибровочных сигналов и сигналов от радионисточников (или её копию), все результаты, полученные в ходе обработки данных на ленте и последующих расчетов.

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Кисляков А. Г., Разин В. А., Цейтлин Н. М. Введение в радиоастрономию. Часть II. — М.: Наука, 1996.
2. Христиансен У., Хёгбом И. Радиотелескопы / пер. с англ. под ред. А. А. Пистолькорса. — М.: Мир, 1988.
3. Томпсон Р., Моран Дж., Свенсон Дж. Интерферометрия и синтез в радиоастрономии. — М.: Мир, 1989.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

4. Горелик Г. С. Колебания и волны. — М.: Физматгиз, 1959.
5. Виткевич В. В. // Астрон. журнал. 1952. Т. 29. Вып. 4. С. 450–462.
6. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. — М.: Наука, 1970.
7. Поль Р. В. Введение в оптику / пер. с нем. — М.-Л.: Гостехиздат, 1947.
8. Есепкина Н. А., Корольков Д. В., Парийский Ю. Н. Радиотелескопы и радиометры. — М.: Наука, 1973.
9. Краус Д. Д. Радиоастрономия. — М.: Сов. радио, 1973.
10. Бакулин П. И., Кононович Э. В., Мороз В. И. Курс общей астрономии. — М.: Наука, 1966.

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. Введение	3
2. Сведения, необходимые для работы с интерферометром в радиоастрономической обсерватории “Старая Пустынь”	10
2.1. Общие соотношения	10
2.2. Задание, выполняемое до эксперимента	13
3. Описание радиоинтерферометра РТ14-1 – РТ14-2	13
3.1. Состав и структура	13
3.2. Объекты исследования и методика эксперимента ...	21
4. Экспериментальная часть	22
Задание 4.1. Техника безопасности при проведении лабораторной работы	22
Задание 4.2. Включение и выключение аппаратуры, контроль за её состоянием	22
Задание 4.3. Калибровка интерферометра по монохроматическому сигналу генератора	24
Задание 4.4. Проведение измерений сигналов от радионсточников	25
Задание 4.5. Обработка экспериментальных данных ...	28
Список рекомендованной литературы	29

**ДОКУЧАЕВ Владимир Платонович
ДУГИН Николай Александрович
РАЗИН Владимир Андреевич**

**РАДИОИНТЕРФЕРОМЕТР:
ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ ПО РАДИОАСТРОНОМИИ**

**Методическая разработка для студентов магистратуры
радиофизического факультета ННГУ**

**Подписано в печать 14.12.2000 г. Формат 60 x 84/16.
Бумага писчая. Печать офсетная. Объем 1,8 усл. п. л.
Тираж 50. Заказ 5505**

**Отпечатано в НИРФИ
Нижний Новгород, ул. Большая Печерская, 25**