

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

Кафедра радиоастрономии и распространения радиоволн
радиофизического факультета ННГУ

Препринт N 463

**ФАЗОВАЯ КАЛИБРОВКА
РАДИОИНТЕРФЕРОМЕТРА**

(Методическая разработка для студентов магистратуры
радиофизического факультета ННГУ)

**Н. А. Дугин
В. А. Разин**

Нижегород
2000

Дугин Н. А., Разин В. А.

Фазовая калибровка радиоинтерферометра: описание лабораторной работы по радиоастрономии для учащихся магистратуры радиофизического факультета ННГУ // Препринт №463 — Нижний Новгород: НИРФИ, 2000. 32 с.

Приведено краткое описание принципов достижения высокой фазовой стабильности радиоастрономических интерферометров.

Изложено содержание заданий по лабораторной работе радиоастрономического характера, подлежащих выполнению на базе интерферометра в радиоастрономической обсерватории “Старая Пустынь”.

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.

1. РАДИОИНТЕРФЕРОМЕТР КАК ВЫСОКОТОЧНЫЙ ФАЗОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ИНСТРУМЕНТ. ПРИНЦИПЫ ФОРМИРОВАНИЯ СИНФАЗНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В РАЗНЕСЕННЫХ ПУНКТАХ

Радиоинтерферометр, как высокоточный фазоизмерительный инструмент, получил в радиоастрономии широкое распространение. С теорией двух- и многоэлементных интерферометров, работающих в радиочастотном диапазоне длин волн, можно ознакомиться в работах [1, 2].

Для достижения высокой фазовой стабильности радиоинтерферометров со связанными элементами необходимо устранить неконтролируемые изменения фаз сигналов, принятых разнесенными антеннами. Нестабильности во времени электрических длин передающих трактов, частотных характеристик генераторов и электронных схем приемной аппаратуры определяют точность измерения разности фаз сигналов, принимаемых антеннами. Сложность обеспечения стабильности трактов потребовала разработки различных схем синхронизации местных гетеродинов и систем фазовой калибровки интерферометров [1–4].

Для осуществления фазовой калибровки радиоинтерферометра необходимо подавать синфазные калибровочные сигналы на входы приемных трактов. При этом удобно использовать внешний сигнал, проходящий через все элементы приемного тракта. Наиболее часто применяемый метод калибровки состоит в передаче калибровочных сигналов по дополнительным линиям связи в прямом и обратном направлениях для учета их электрической длины. Задача системы синхронизации гетеродинных напряжений — подача синфазных сигналов общего гетеродина достаточной интенсивности на смесители периферийных пунктов. Очевидно, что только синхронизация гетеродинов не решает задачи достижения требуемой фазовой стабильности инстру-

мента, поскольку не контролируется сигнал промежуточной частоты (ПЧ). Однако, в ряде случаев, один из которых используется в интерферометре НИРФИ и описан ниже, система фазовой калибровки решает задачу полностью.

На рис. 1 приведена схема двухэлементного радиointерферометра и последовательность преобразования сигналов в нем. На рисунке указано назначение блоков и обозначены точки, для которых записываются характерные полные фазы сигналов, поскольку для описания работы схемы важны изменения полных фаз, а не их абсолютные значения. Полагаем далее, что при всех преобразованиях сигналов оставляем только сигнал разностной частоты, отфильтровывая сигнал суммарной частоты. Оба плеча интерферометра симметричны, поэтому значения полных фаз приводятся для одного плеча.

Частоты сигналов — полезного ω_c , гетеродина ω_r и промежуточной частоты $\omega_{пч}$, передаваемых по линиям связи, выберем в соответствии со следующим соотношением

$$\omega_c = \omega_r + \omega_{пч}, \quad \omega_{пч} \ll \omega_r.$$

Полная фаза сигнала гетеродина в точке {1}: $\omega_r t + \varphi_r^{(1)}$, где $\varphi_r^{(1)}$ — начальная фаза напряжения гетеродина, которую в дальнейшем для простоты положим равной нулю. Распространяясь по линии связи l_1 , сигнал гетеродина задерживается на время $\tau_1 = l_1/c$, где l_1 — длина кабельной линии, c — скорость распространения электромагнитной волны в линии. Тогда в точке {2} фаза напряжения гетеродина будет иметь вид $\omega_r(t - \tau_1)$. Фазу принимаемого сигнала на входе смесителя (СМ) (точка {3}) запишем как

$$\omega_c t = (\omega_r + \omega_{пч}) t,$$

также полагая для простоты начальную фазу равной нулю. Пространственную задержку сигнала $\tau(t)$ и задержку τ_a , вводимую линией задержки в тракт второй антенны, запишем в результирующем соотношении. На выходе смесителя, фильтра и усили-

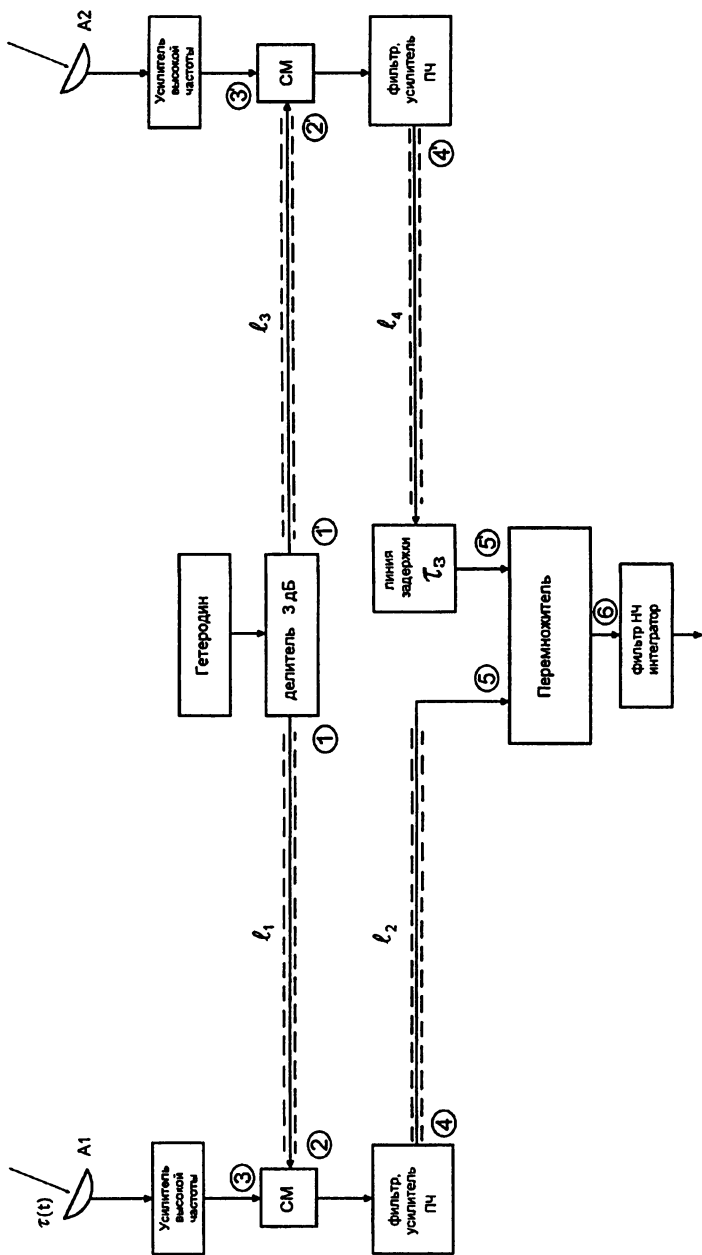


Рис. 1. Схема радиоинтерферометра

теля промежуточной частоты (УПЧ) (точка {4}) фаза напряжения промежуточной частоты запишется в виде

$$\omega_c t - \omega_r(t - \tau_1) = \omega_{пч}t + \omega_r \tau_1.$$

Этот сигнал возвращается в центральный пункт (ЦП) по кабельной линии связи ℓ_2 и задерживается соответственно на время $\tau_2 = \ell_2/c$. Тогда на входе перемножителя (точки {5} и {5'}) будут два сигнала с фазами

$$\begin{aligned} \omega_{пч}(t - \tau_2) + \omega_r \tau_1 - \omega_c \tau(t), \\ \omega_{пч}(t - \tau_4) + \omega_r \tau_3 - \omega_{пч} \tau_0. \end{aligned}$$

Фаза выходного сигнала после перемножения, фильтрации и усиления будет пропорциональна

$$\omega_{пч}(\tau_2 - \tau_4) + \omega_r(\tau_1 - \tau_3) + \omega_r \tau(t) + \omega_{пч}(\tau(t) - \tau_0). \quad (1)$$

Из соотношения (1) видно, что фазовая стабильность интерферометра в большей степени определяется разностями $\ell_1 - \ell_3$ и $\ell_2 - \ell_4$, стабильностями частот задающих генераторов, точностью выполнения задержки и нестабильностью среды распространения радиоволн. Поэтому для достижения высокой фазовой стабильности аппаратурной части инструмента желательно добиваться идентичности передающих трактов. Необходимость принятия специальных мер по уменьшению флуктуаций фазы СВЧ-сигнала, прошедшего через длинную линию передачи, с очевидностью следует из рассмотрения вытекающего из предыдущего анализа соотношения

$$\Delta\varphi = 2\pi \frac{L}{\lambda} \left(\frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta f}{f} \right), \quad (2)$$

связывающего флуктуации фазового сдвига $\Delta\varphi$ на выходе линии с относительными флуктуациями электрической длины линии $\Delta L/L$ и частоты генератора $\Delta f/f$, λ — длина волны.

Для линии передачи типа коаксиального кабеля с полувоздушным заполнением величина $\Delta L/L$ в интервале изменения температуры порядка 20° составляет примерно 10^{-3} , что, например, при длине линии передачи $L \sim 1$ км дает на частоте 6 ГГц величину температурных фазовых флуктуаций более 200 радиан.

Тем не менее в простейшем виде (рис. 1) при малых базовых расстояниях сигнал гетеродина из ЦП передается непосредственно на смесители, нестабильность Δf частоты генератора зависит от длины трактов, рабочей частоты и определяется как

$$\frac{\Delta f}{f} \leq \frac{\lambda}{L} \cdot \frac{1}{N}, \quad (3)$$

где N определяет требуемую погрешность ($N = 360$ при погрешности фазы 1°). Контроль фазовой стабильности инструмента ведется с помощью системы фазовой калибровки с периодичностью, определяемой техническим исполнением кабельных трасс (марка кабелей, температурная изоляция, подкачка воздухом и т. д.) и внешними условиями. Подобная схема применена на интерферометре НИРФИ дециметрового диапазона: длина трасс до антенн $L = 220$ м, $f_r = 600$ МГц, стабильность кварцевого генератора $\sim 10^{-7}$. Калибровка проводится в среднем один раз в час, уходы фазы составляют 5–15 град/час при перепадах температуры в несколько градусов при смене дня и ночи, максимальные уходы фазы в экстремальных условиях не превышали 90 град/час. Особенность данной схемы — требование большой мощности гетеродина, что обуславливает её применение в системах с малыми базами и низкими рабочими частотами.

При синхронизации местных генераторов по центральному опорному можно работать на низких частотах (НЧ) опорного генератора (~ 5 МГц), но с точки зрения влияния линии связи на фазу сигнала эта схема эквивалентна первой, поскольку флуктуации фазы низкочастотного сигнала умножаются в соответствующее число раз ($n = f_{\text{вч}}/f_{\text{нч}}$). Выигрыш этой схемы только

в малых потерях НЧ сигнала в трактах, но требуется сложная схема фазовой автоподстройки частоты на периферийных пунктах, особые требования предъявляются и к качеству умножителей.

Поэтому в технике радиоинтерферометрии разработан целый ряд более сложных методов, позволяющих исключить влияние флуктуаций электрической длины линий передачи на фазы напряжений местных гетеродинов в антенных пунктах. Эти методы, используемые также и при создании систем фазовой калибровки радиоинтерферометров, можно условно разделить на несколько групп. К первой относятся методы [1, 5, 6], основанные на измерении фазового сдвига волны, отраженной на конце линии передачи, и коррекции изменений длины этой линии управляемыми фазовращателями или при последующей обработке результатов радиоастрономических измерений. Для выделения на входе линий полезной компоненты, отраженной от конца линии, на фоне отражений от внутренних неоднородностей тракта отражение на конце линии модулируется по амплитуде или фазе. Измерение слабой модулированной компоненты на фоне сильных немодулированных помех осуществляется с применением техники синхронного детектирования. Модуляционные методы обеспечивают приемлемую точность фазовых измерений ($2-3^\circ$) при потерях в линии передачи не более 30–40 дБ.

Второй метод, называемый методом “фазовых измерений на пути туда и обратно”, аналогичен первому в том, что сигнал с антенны возвращается по той же линии передачи или параллельной ей. Но возвращаемый сигнал получается теперь не посредством отражения, а генерируется на антенне с использованием схем фазовой синхронизации и вводится в линию через направленный ответвитель. Преимущество его перед первым в том, что в цепь фазовых измерений можно включить большую часть электронных схем на антенне.

К третьей группе методов формирования синфазных напряжений на антенных пунктах можно отнести методы, в которых

эти напряжения синтезируются из напряжений, передаваемых по линии связи в противоположных направлениях. В [4] рассмотрены схемы, в которых по линии передаются в противоположных направлениях напряжения близких частот $\omega = (\omega_0 + \Omega)/2$, которые выделяются в антенных пунктах направленными ответвителями (НО) и перемножаются аналоговыми перемножителями. Разность фаз напряжений частоты ω_0 , синтезированных в пунктах, соединенных линией длиной l , составляет $2\Omega l/v_\phi$ (v_ϕ — фазовая скорость волны в линии). Синфазность синтезированных напряжений достигается при равенстве частот передаваемых навстречу друг другу напряжений ($\Omega = 0$). Недостатком метода является сложность выделения на выходах перемножителей полезных компонент частоты ω_0 на фоне вторых гармоник с близкими частотами $2\omega_+$ и $2\omega_-$. Этот недостаток обусловлен потерями и внутренними неоднородностями линии связи, а также неидеальностью характеристик НО и смесителей.

Разрабатывались схемы формирования сигналов гетеродина, имеющие уже совершенно другой порядок сложности электронных систем.

Методы формирования синфазных сигналов на концах длинных трасс или контроля их электрической длины применяются и для создания систем фазовой калибровки. Однако, для фазовых измерений сигналов, пропущенных по линии передачи в одну и другую сторону (или обратно по параллельной линии) в большинстве случаев требуется дополнительный комплект аппаратуры для определения длины этой линии, либо создаются сложные аппаратурные комплексы, сочетающие передачу “полезных” сигналов с сигналами калибровки. В любом случае сигнал калибровки должен пройти через все активные элементы приемного тракта.

2. СИСТЕМЫ ФАЗОВОЙ КАЛИБРОВКИ

2.1. Внутренняя фазовая калибровка радиоинтерферометра

Системой фазовой калибровки в чистом виде можно считать схему Моримото [7], примененную в радиогелиографе в Културе, и использованную в качестве прототипа в инструментах НИРФИ.

На рис. 2 приведена блок-схема контроля разности электрических длин плеч интерферометра НИРФИ с указанием марок примененных кабелей. Одно из преимуществ данной схемы в том, что можно контролировать разность электрических длин сразу двух пар кабелей $\ell_1 - \ell_2$ и $L_1 - L_2$, однако при этом необходимо иметь дополнительную кабель D , соединяющий две антенны и не имеющий разрыва в центре.

Необходимые данные о калибруемых кабелях накапливаются в течение одного цикла измерений, состоящего из четырех замеров фазы сигналов, направляемых от генератора к фазометру различными путями с помощью двух переключателей:

$$\begin{aligned}\Phi_1 &= \ell_1 + L_1 & \Phi_3 &= \ell_2 + L_2 \\ \Phi_2 &= \ell_2 + D + L_1 & \Phi_4 &= \ell_1 + D + L_2,\end{aligned}\quad (4)$$

здесь Φ_i — показания фазометра (целое число длин волн не определяется). Комбинируя эти уравнения различными способами, получим

$$\begin{aligned}\Delta L &= L_1 - L_2 = 1/2(\Phi_1 + \Phi_2 - \Phi_3 - \Phi_4) \\ \Delta \ell &= \ell_1 - \ell_2 = 1/2(\Phi_1 - \Phi_2 - \Phi_3 + \Phi_4) \\ D &= 1/2(-\Phi_1 + \Phi_2 - \Phi_3 + \Phi_4).\end{aligned}\quad (5)$$

Очевидно, время одного замера должно быть таким малым, чтобы уходы электрической длины кабелей за время между отдельными измерениями в цикле не превышали ошибки измерений. В

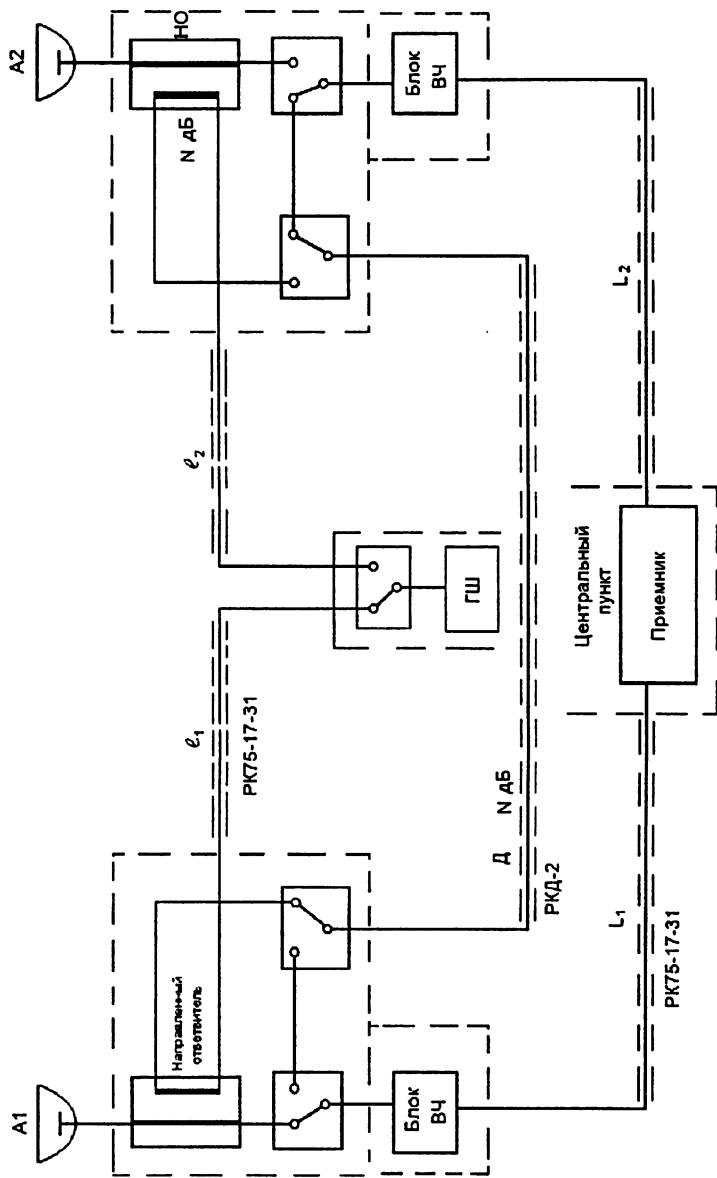


Рис. 2. Блок-схема системы фазовой калибровки

нашей схеме (рис. 2) для сокращения времени калибровки проводятся только два замера (l_1 и l_2 исключаются). В этом случае

$$\begin{aligned}\Delta L &= L_1 - L_2 = 1/2 (\Phi_4 - \Phi_2) \\ D &= 1/2 (\Phi_4 + \Phi_2).\end{aligned}\tag{6}$$

Погрешность определения разности фаз трактов данной системой составила 2–3° при средней периодичности калибровок один раз в час.

Системы внутренней фазовой калибровки позволяют контролировать фазовую стабильность подсистем инструмента только от точки введения калибровочного сигнала. В зависимости от конструкции антенны неконтролируемый участок тракта от облучателя может достигать существенных величин (до нескольких метров) и влиять на точность измерений фазы. Кроме того, нежесткость зеркала (тепловые и механические деформации) и погрешности системы наведения требуют проведения калибровки по внешнему сигналу, прошедшему все участки приемных трактов, включая антенны. На рис. 3 показан вариант рассмотренной выше схемы с охватом антенных систем; здесь же применен способ калибровки по внутренним источникам шумового излучения (ГШ — генератор шума), расположенным на каждой антенне, что позволяет применить генераторы с меньшей мощностью и сократить число кабельных трасс. Однако, практически крайне сложно провести наведение антенн друг на друга, тем более в периодическом режиме.

2.2. Внешняя фазовая калибровка радиointерферометра

Внешняя фазовая калибровка проводится обычно по внеземным радиоисточникам, несмотря на их малую интенсивность. В качестве калибровочных выбираются точечные источники (с

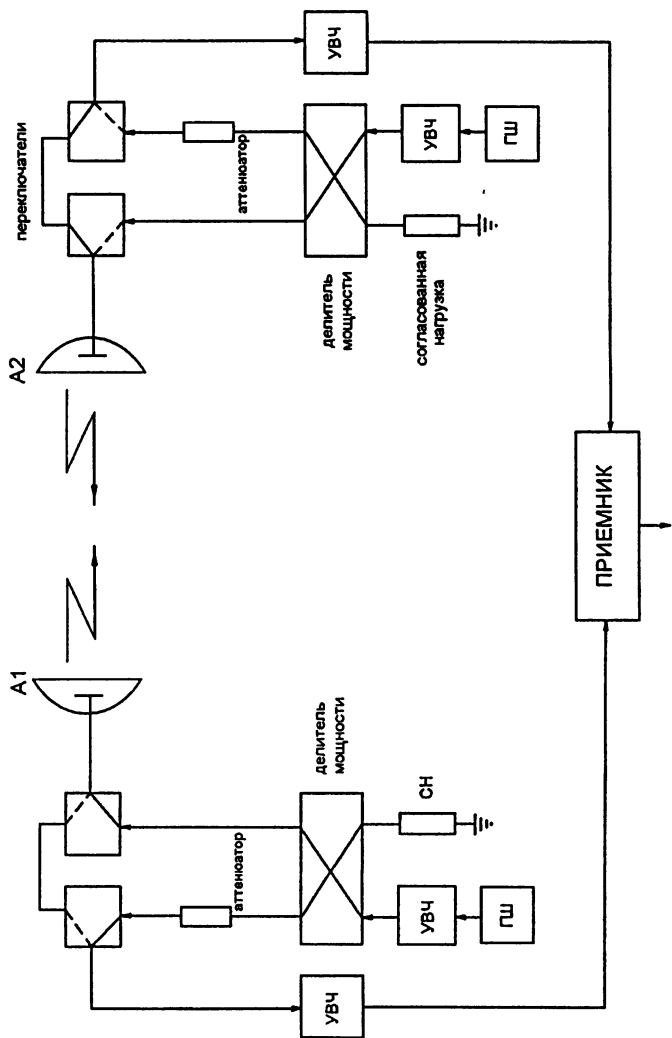


Рис. 3. Вариант системы фазовой калибровки.

угловыми размерами много меньшими ширины интерференционного лепестка) с точно известными плотностью потока, координатами и поляризацией. Наблюдаются они с периодичностью, определяемой внешними условиями и состоянием атмосферы. Для внешней фазовой калибровки требуется также знание параметров базы интерферометра (проекции X, Y, Z и координаты места установки).

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:

$$\begin{aligned} L &= Z \sin \varphi_{\text{п}} - X \cos \varphi_{\text{п}} \\ M &= Z \cos \varphi_{\text{п}} + X \sin \varphi_{\text{п}} \\ N &= Y \end{aligned} \quad (7)$$

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:

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_{\text{инт}} + k(L \sin \delta + M \cos \delta \cos t + N \cos \delta \sin t), \quad (8)$$

где δ, t — склонение и часовой угол источника излучения, $\Delta\varphi_{\text{инт}}$ — неконтролируемая системой внутренней фазовой калибровки разность длин приемных трактов, $k = 2\pi/\lambda$. Разность фаз трактов, измеренная системой внутренней калибровки, в соотношении (8) учтена вычитанием её из измеренной величины $\Delta\varphi$.

Принцип внешней калибровки заключается в измерении разности фаз $\Delta\varphi$ по радиоисточнику с известными координатами

в определенный момент времени, расчет предполагаемого значения разности фаз по соотношению (8) (второй член правой части) и получение значения $\Delta\varphi_{\text{инт}}$ вычитанием измеренной и вычисленной фаз.

2.3. Сведения, необходимые для работы с радиоинтерферометром в радиоастрономической обсерватории “Старая Пустынь”

А) Основные соотношения.

Для проведения внешней фазовой калибровки инструмента, обработки данных и получения результатов необходимо знать ряд основных интерферометрических и астрономических соотношений и величин (см., например, [8]).

Разность фаз принимаемых сигналов определяется соотношениями (7), (8).

Задержка сигнала ΔD в метрах для одной из антенн определяется как

$$\Delta D [\text{м}] = L \sin \delta + \cos \delta (M \cos t + N \sin t) \quad (9)$$

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

$$\Delta D_{\text{дискр}} = 2/3 \Delta D. \quad (10)$$

Период интерференционной картины в минутах декретного времени

$$T_{\text{и}} = \frac{720 \lambda}{\pi \cos \delta (N \cos t - M \sin t)(1 + \mu)}. \quad (11)$$

Астрономическая постоянная $\mu = 0,00273791$. Часовой угол источника во временной мере равен

$$t = (T - T_{\text{кульм}})(1 + \mu), \quad (12)$$

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

$$T_{\text{кульм}} = 3^{\text{h}} + \frac{\alpha - S_0 - \lambda_{\text{п}}}{1 + \mu}, \quad (13)$$

здесь α — прямое восхождение источника, $\lambda_{\text{п}}$ — долгота места, S_0 — звездное время на данные сутки.

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

$$\begin{aligned} \cos h \sin A &= \cos \delta \sin t \\ \sin h &= \sin \delta \sin \varphi_{\text{п}} + \cos \delta \sin \varphi_{\text{п}} \cos t \\ \cos h \cos A &= -\sin \delta \cos \varphi_{\text{п}} + \cos \delta \sin \varphi_{\text{п}} \cos t. \end{aligned} \quad (14)$$

Источники, для которых $\delta > 90^\circ - \varphi_{\text{п}}$, являются незаходящими и имеют верхнюю и нижнюю кульминации. Высота источника определяется как $h = 90^\circ + \delta - \varphi_{\text{п}}$ для верхней кульминации к югу от зенита, $h = 90^\circ - \delta + \varphi_{\text{п}}$ для верхней кульминации к северу от зенита, $h = -90^\circ + \delta + \varphi_{\text{п}}$ для нижней кульминации.

Время восхода и захода источников определяется по соотношению

$$\cos t = -\text{tg } \delta \text{ tg } \varphi_{\text{п}}, \quad (15)$$

которое имеет два решения. Пересчет к декретному времени ведется по соотношениям (12), (13)

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 радиисточников на эпоху 1999.0 и плотности потоков на частоте 150 МГц:

Таблица А

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

Б) Задание, выполняемое до эксперимента

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

- рассчитать время кульминации 4-х радиисточников (таблица А);
- по заданному времени наблюдения выбрать один из четырех радиисточников по критерию: $T_{\text{и}} \leq 15$ минут и максимальной плотности потока;
- рассчитать задержку для предполагаемого момента наблюдения;
- рассчитать координаты A и h для предполагаемого момента наблюдения источника.

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 радионизлучения и дискретных радионсточников большой протяженности со сложной структурой и слабопеременной интенсивностью.

Технические характеристики антенной системы интерферометра:

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

Состав приемной аппаратуры (рис. 4, 5):

- 1) корреляционный радиометр с квадратурным выходом;
- 2) система фазовой калибровки, обеспечивающая контроль разности электрических длин (фаз) передающих высокочастотных (ВЧ) трактов интерферометра с точностью 2–3° (рис. 2);
- 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 од-

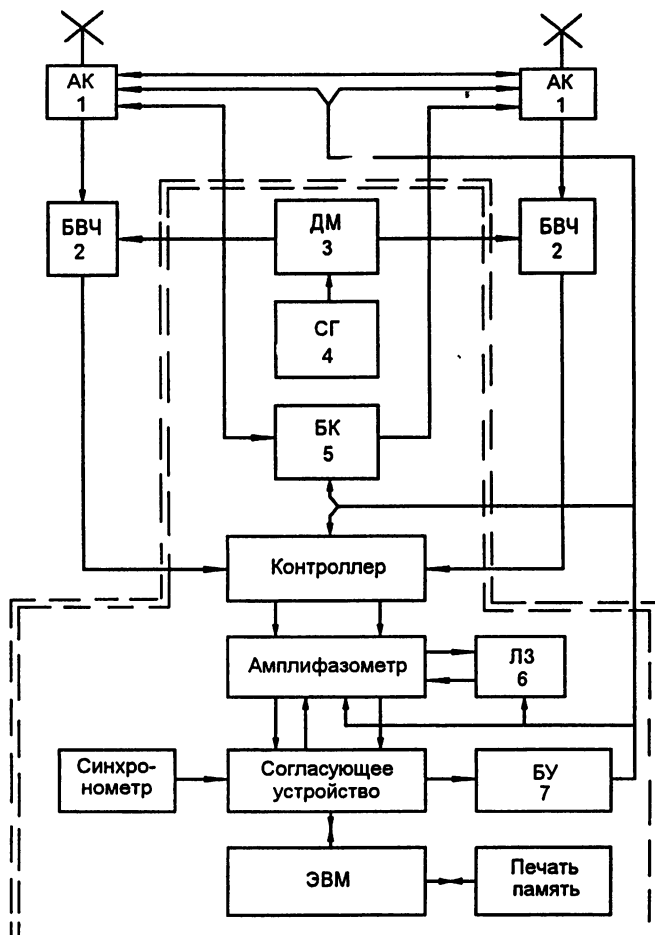


Рис. 4. Блок-схема приемной аппаратуры радиоинтерферометра.
 1 — антенные коммутаторы; 2 — блоки высокой частоты; 3 — делитель мощности гетеродина; 4 — синхронизованный гетеродин 197 МГц; 5 — блок калибровки; 6 — линия задержки; 7 — блок управления режимами работы.

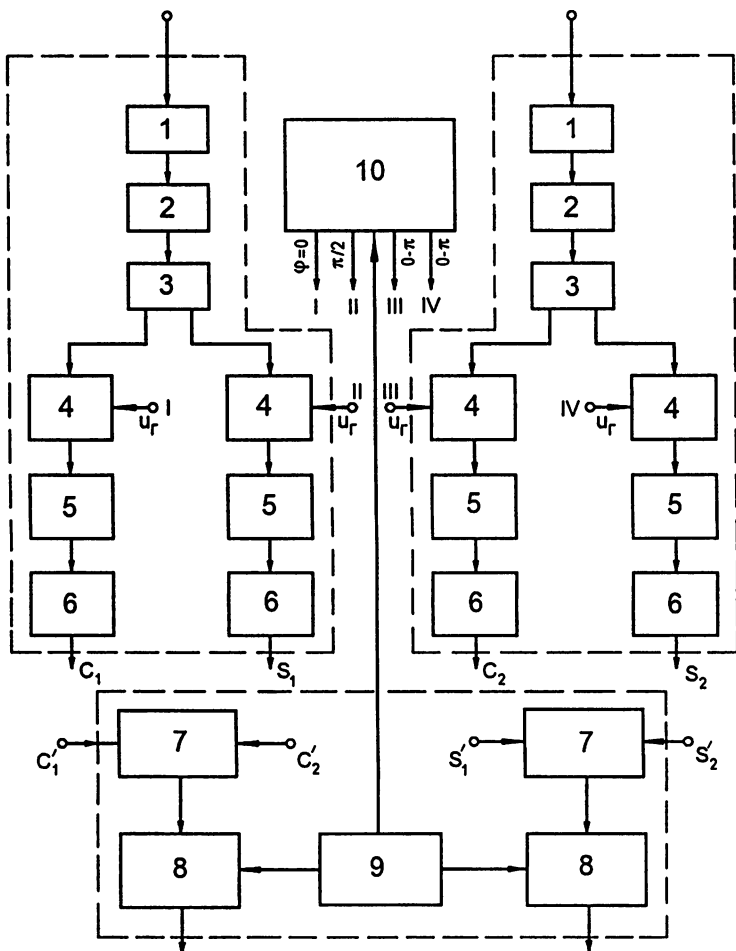


Рис. 5. Блок-схема амплифазометра (коррелятора).

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.

но- двухполосной (ОП–ДП) схеме с переключением фазы [9, 10], позволяющей сочетать положительные свойства ОП и ДП приемников, а именно, облегчение фазовых операций при ОП-приеме и более простую реализацию линий задержки (ЛЗ) и коррелятора для ДП-приема.

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 линии связи радиointерферометра — кабельные тракты от антенн до ЦП, по которым передаются сигналы гетеродина, промежуточной частоты и фазовой калибровки. При проведении внешней фазовой калибровки по естественному радиоисточнику будет оценено влияние на фазовые характеристики инструмента нежесткости антенн и неточности изготовления отрезков трактов от облучателей до направленных ответвителей, через которые вводятся искусственные калибровочные сигналы.

б) Методика измерений при внутренней фазовой калибровке предполагает проведение измерений разности фаз монохроматических сигналов, прошедших через различные комбинации канализирующих трактов и определение рабочей разности фаз $\Delta\varphi_{\text{инт}}$, при этом в тракты гетеродина или ПЧ вводятся дополнительные отрезки кабелей для определения их электрической длины и погрешности всей системы калибровки. При внешней калибровке производится запись сигнала от радиоисточника при его прохождении через диаграмму направленности 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 диаграмму направленности антенн до его выхода из нее с нанесением меток времени.

в) Обработка результатов. Результатом первичной обработки записи сигнала на ленте самописца являются: амплитуды сигналов, прошедших линии связи различным путем, интерферограмма записи сигнала от внешнего источника, моменты равенства фазы интерферограммы 0 и π (переходы через нуль). По этим данным определяются разности фаз рабочих трактов,

дополнительного и вспомогательных трактов системы фазовой калибровки и разность фаз отрезков трактов, не контролируемых внутренней фазовой калибровкой.

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 кабинках 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. Фазовая калибровка 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, определение нулевых уровней каналов и собственно фазовая калибровка при различных положениях линии переменной длины (ЛПД), вставленной в тракт гетеродина или ПЧ. Калибровочный сигнал от генератора Г4-102 с частотой 152 МГц через делители БФК подается на входы ВЧ блоков приемника, расположенных в кабинах антенн. 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 (А1) несколькими нажатиями кнопки “пуск” при положении “руч.” переключателя “ЭВМ – руч. – авт.” восточной 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 выровнить 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.

Амплитуды синусоидальных кривых двух каналов являются результатом калибровки усиления; по ним рассчитывается поправочный коэффициент $K = S/C$ отношения усиления двух каналов для корректного расчета измеренных значений фазы.

5) Фазовая калибровка:

- а) остановить фазовращатель в положении “0” тумблером “работа – стоп”;
- б) провести запись постоянных сигналов в течение 2-х минут при положении тумблеров на БФК: “ГСС” → “вкл”, “А1” → “вкл”;
- в) переключить тумблер “А1–А2” на БФК в положение “А2” и произвести запись сигналов в течение 2-х минут.

Полученные значения \sin - и \cos -каналов позволяют рассчитать величины Φ_4 и Φ_2 и определить разность электрических длин (с точностью до π) калибровочных и рабочих трактов по соотношениям (6);

- г) Изменить длину ЛПД в тракте гетеродина на 4 см (7,2 градуса по фазе) и повторить измерения по пп. 5 б, в).

Задание 4.4. Проведение внешней фазовой калибровки по радиоисточнику

Порядок работы:

1) Выключить сигнал калибровочного генератора кнопкой «НГ».

2) Провести подготовку к наблюдению одного из радиоисточников таблицы А:

— рассчитать часовой угол источника на текущее время T по соотношению (12),

— определить период интерференционной картины T_{II} по соотношению (11), интервал записи сигнала определен в 30 минут — время, за которое источник пройдет примерно половину диаграммы направленности антенн; если в этом интервале будет меньше $2T_{II}$, то следует перейти к наблюдению другого источника,

— определить время T_{cp} середины интервала наблюдения как

$$T_{cp} = T + \Delta T_{уст} + 15^m,$$

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

— рассчитать для T_{cp} часовой угол источника (12), задержку ΔD по соотношениям (10), (11) и координаты источника (A, h) в горизонтальной системе координат по соотношениям (14);

— установить задержку ΔD 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 $(T_{cp} + 15^m)$, пример записи одного периода интерференционной картины дан на рис. 6.

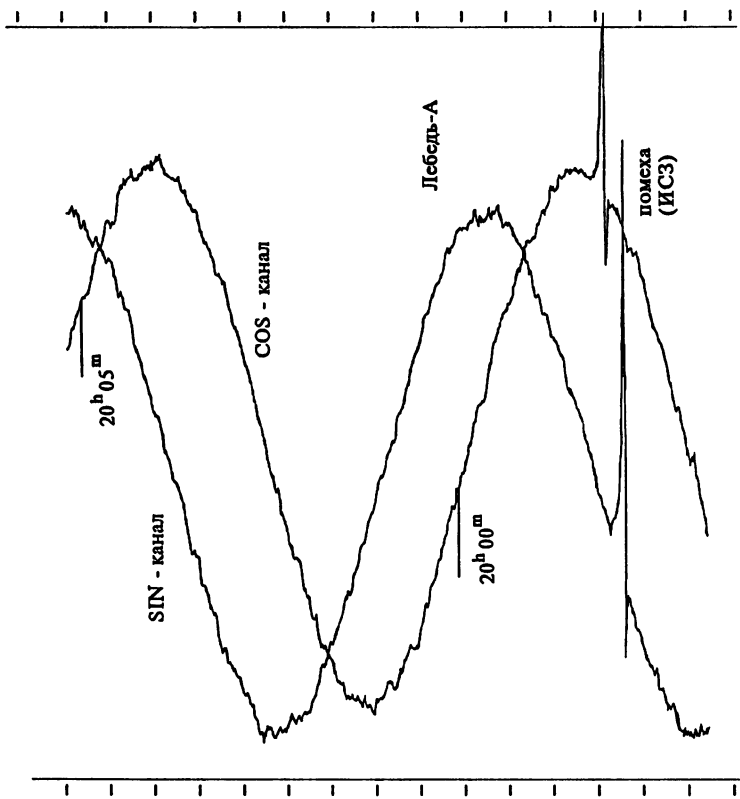


Рис. 6. Пример записи сигнала от радионисточника Лебедь-А на ленте самописца.

Задание 4.5. Обработка экспериментальных данных

1. Первичная обработка записей сигналов.

а) Определить амплитуды калибровочных сигналов \sin - и \cos -каналов и их нулевые уровни по записи с фазовращателем;

б) определить амплитуды постоянных калибровочных сигналов \sin - и \cos -каналов относительно полученных нулевых уровней для двух направлений подачи калибровочного сигнала с БФК (“А1” и “А2”) и для двух положений ЛПД;

в) по записи сигнала радиисточника определить нулевые уровни сигналов \sin - и \cos -каналов и моменты времени при равенстве нулю сигналов обоих каналов.

2. Получение результатов.

а) Рассчитать значения фазы Φ_4 и Φ_2 для всех случаев и получить величины разности фаз рабочих и калибровочных трактов по соотношению (15).

Оценить точность калибровки по разности полученных результатов с известным сдвигом фаз ЛПД.

б) По соотношениям (7), (8) 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.

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 радиисточников (или её копию), все результаты, полученные в ходе обработки данных на ленте и последующих расчетов.

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Основная литература

1. Томпсон Р., Моран Дж., Свенсон Дж. Интерферометрия и синтез в радиоастрономии. — М.: Мир, 1989.
2. Кисляков А. Г., Разин В. А., Цейтлин Н. М. Введение в радиоастрономию. Часть II. — М.: Наука, 1996.

Дополнительная литература

3. ТИИЭР. 1973. Т. 61. N 9. С. 1249–1257; 1258–1266.
4. Напьер П. Дж., Томпсон А. Р., Экерс Р. Д. Большая антенная решетка (VLA) // ТИИЭР. 1983. Т. 71. N 11. С. 1295–1320.
5. Swarup G., Yang K. S. // IRE Trans. Ant. Prop. 1961. AP-9. P. 75–81.
6. Legg T. H. // IEEE Trans. Ant. Prop. 1965. AP-13. P. 428–432.
7. Morimoto M. // Elect. Lett. 1965. V. 1. N 7. P. 192–193.
8. Бакулин П. И., Кононович Э. В., Мороз В. И. Курс общей астрономии. — М.: Наука, 1966.
9. Христиансен У., Хёгбом И. Радиотелескопы / Пер. с англ. под ред. А. А. Пистолькорса. — М.: Мир, 1988.
10. Беагон В. С., Дугин Н. А., Романычев А. А., Семенова Л. Р., Турчин В. И., Цейтлин Н. М. Двухэлементный радиоинтерферометр НИРФИ, предназначенный для работы в системе апертурного синтеза // Препринт N 143. — Горький, НИРФИ, 1980.

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. Радиоинтерферометр как высокоточный фазоизмерительный инструмент. Принципы формирования синфазных напряжений в разнесенных пунктах	3
2. Системы фазовой калибровки	10
2.1. Внутренняя фазовая калибровка радиоинтерферометра	10
2.2. Внешняя фазовая калибровка радиоинтерферометра	12
2.3. Сведения, необходимые для работы с радиоинтерферометром в радиоастрономической обсерватории “Старая Пустынь”	15
А) Общие соотношения	15
Б) Задание, выполняемое до эксперимента ...	17
3. Описание радиоинтерферометра РТ14-1 – РТ14-2	17
3.1. Состав и структура	17
3.2. Объекты исследования и методика эксперимента	22
4. Экспериментальная часть	23
Задание 4.1. Техника безопасности при проведении лабораторной работы	23
Задание 4.2. Включение и выключение аппаратуры, контроль за её состоянием	23
Задание 4.3. Фазовая калибровка интерферометра по монохроматическому сигналу генератора	25
Задание 4.4. Проведение внешней фазовой калибровки по радиоисточнику	27
Задание 4.5. Обработка экспериментальных данных .	29
Список рекомендованной литературы	30

**ДУГИН Николай Александрович
РАЗИН Владимир Андреевич**

**ФАЗОВАЯ КАЛИБРОВКА РАДИОИНТЕРФЕРОМЕТРА:
ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ
ПО РАДИОАСТРОНОМИИ**

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

Подписано в печать 14.12.2000 г. Формат 60 × 84/16.
Бумага писчая. Печать офсетная. Объем 1,8 усл. п. л.
Тираж 50. Заказ 5506

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