

Научно-исследовательский радиофизический институт  
Министерства общего и профессионального образования  
Российской Федерации

Препринт N 450

**ПРИМЕНЕНИЕ МАЛОБАЗОВЫХ  
РАДИОАСТРОНОМИЧЕСКИХ  
ИНТЕРФЕРОМЕТРОВ ДЛЯ КООРДИНАТНЫХ  
И ТРАЕКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ**

Часть 1

Н. А. Дугин  
И. П. Кузнецова  
В. А. Разин  
Г. Г. Смышляева

Нижний Новгород, 1999

Дугин Н. А., Кузнецова И. П., Разин В. А., Смышляева Г. Г.  
Применение малобазовых радиоастрономических интерферометров для координатных и траекторных измерений. // Препринт N 450. — Нижний Новгород: НИРФИ, 1999. 36 с.

УДК 520.274

В первой части работы рассматриваются возможности применения фазостабильных радиоинтерферометров (“со связанными элементами”), технически и методически разработанных для проведения радиоастрономических исследований с высокими разрешением и чувствительностью (апертурный синтез), для решения задач координатных, траекторных и навигационных измерений по искусственным сигналам космических аппаратов. Проведен анализ решения задачи для источников излучения с переменными координатами, сделаны оценки точности измерений, определены условия на параметры инструментов. Проведен анализ факторов, влияющих на точность фазовых измерений, необходимый при создании навигационных интерферометрических комплексов (антенн, аппаратуры, методики). Оценены возможности абсолютного и дифференциального методов координатных измерений.

## ВВЕДЕНИЕ

Радиоастрономические интерферометры со связанными элементами (РИСЭ) [1] могут быть использованы для решения задач прикладного характера, а именно:

— высокоточного определения координат космических аппаратов (КА) на далеких орбитах [2] и космической навигации [3, 4];

— высокоточного определения векторов баз РИСЭ с целью закрепления сети реперов на поверхности Земли для уточнения и дополнения геодезической сети; непрерывного контроля стабильности векторов баз с целью определения уровней смещения точек поверхности Земли в сейсмоактивных зонах относительно стационарных геологических платформ для разработки методов прогноза землетрясений;

— контроля изменения координат места установки инструментов для изучения геодинамических параметров [5];

— для фазирования и суммирования сигналов крупных антенных комплексов с целью повышения дальности и надежности приема сигналов КА с применением техники РИСЭ без строительства новых больших и дорогостоящих антенных систем [6];

— для оперативного контроля среды распространения радиоволн на трассах Земля – КА и для учета влияния атмосферы на координатные и навигационные измерения [7].

В связи с уменьшением на территории нашей страны числа наземных контрольно-измерительных пунктов, выполняющих траекторные, координатные и навигационные измерения ИСЗ и ракет-носителей, крайне актуальной стала задача повышения точности указанных измерений при максимальной экономии средств. Поскольку параметры орбит спутников подвержены изменениям под влиянием аномалий гравитационного поля Земли, неравномерности скорости ее вращения, торможения

в атмосфере, давления солнечного ветра и т. д., для расчета орбит используются данные длительных наблюдений за движением ИСЗ и сложные алгоритмы уточнения его положения на определенный момент времени от расчетной точки, учитывающие геодинамические и геофизические факторы.

Радиоастрономические интерферометрические комплексы позволяют, в принципе, проводить измерения угловых координат объектов и параметров их траекторий в реальном времени с высокой точностью и определять их положение на орбите при наличии двух–трех пунктов слежения.

Проблема повышения эффективности функционирования космических навигационных систем (КНС), таких как глобальная отечественная КНС “ГЛОНАСС” [8], в настоящий момент крайне актуальна из-за неполного её развертывания и уменьшения надежности работы НИСЗ, выработавших ресурс эксплуатации. Для её решения необходимо:

— повышение точности определения координат НИСЗ, а следовательно, и навигационных параметров потребителей;

— повышение оперативности определения положения НИСЗ для уменьшения “возраста” альманаха данных и для контроля целостности системы;

— фиксация положения НИСЗ на небесной сфере (привязка к опорным внеземным радиоисточникам в экваториальной системе координат);

— повышение точности определения положения и ориентации объектов-потребителей сигналов навигационных систем;

— уменьшение времени получения первого отсчета для аппаратуры потребителей;

— учет влияния среды распространения радиоволн на работу КНС.

Анализ фазометрических методов координатных измерений, основанных на методологии радиоастрономической интерферометрии, показывает, что применение последних для траекторных и координатных измерений, для контроля и учета

влияния среды распространения радиоволн может обеспечить в сочетании со штатными навигационными средствами существенное повышение эффективности КНС.

В системах дальней космической связи особо актуальными являются задачи определения положения КА и увеличения дальности приема сигналов КА. Задача точного определения координат и скорости КА на далеких от Земли орбитах решается с помощью РСДБ, но при этом очевиден основной недостаток — значительное (до нескольких суток) время между приемом сигнала и получением результата (параметров орбиты), который исключает возможность применения РСДБ для оперативной работы по низкоорбитальным ИСЗ. Кроме этого, не реализуются возможности разрешения глобальных инструментов из-за различных аппаратурных, методических факторов. Малобазовые (до 100 км) интерферометрические системы со связанными элементами имеют ряд преимуществ [9]:

— передача данных для обработки ведется в реальном времени, что позволяет уменьшить до предела “время возврата”, то есть время между приемом данных, получением результата и выдачей соответствующих команд на КА;

— корреляционная обработка в реальном времени позволяет применять технику и методику обработки малобазовых систем и исключить недостатки РСДБ;

— общий гетеродин или синхронизируемые гетеродины ослабляют требования к частотной стабильности генераторов;

— уменьшаются ошибки, обусловленные нестабильностью среды распространения, так как чем меньше база, тем эти эффекты менее различны на обеих приемных антеннах;

— большие периоды интерференционной картины и неограниченность выбора источников по высоте подъема над горизонтом облегчают запись и график проведения наблюдений и также снижают влияние атмосферы на фазу сигнала;

— благодаря точному определению величины задержки сигналов от пары антенн и сведению их в пункт обработки в ре-

альном времени возможно суммирование сигналов всех антенн по высокой частоте без предварительной записи огромных объемов информации (что вообще проблематично).

Основным достоинством РИСЭ является возможность высокоточного измерения разности фаз (задержки) сигналов от двух антенн, благодаря чему при определенных начальных условиях можно определить положение источника излучения с точностями, сравнимыми с РСДБ. По данным [10] на интерферометре с базой 21 км на длинах волн 3,5 и 13 см достигнута точность определения положения радиоисточника  $\sim 50 \dots 100$  нрад ( $0'',01$ ) при сравнительной точности 20 нрад РСДБ с базой 8000 км. С другой стороны, по данным [6] техника как систем апертурного синтеза, так и систем РСДБ – РИСЭ, используется для суммирования сигналов КА с целью увеличения эффективной площади приемного комплекса и, соответственно, увеличения дальности приема; в эксперименте использовались полная система апертурного синтеза VLA (27 антенн по 25 м диаметром) и пары антенн — 70 м и 34 м диаметром, расположенные на разных континентах.

Фазометрические методы в космической навигации не новы; они применялись ранее и применяются до сих пор [11]. Однако, из-за небольших баз рабочих инструментов не удалось достичь точностей лучше, чем при использовании других радиотехнических средств. Из анализа имеющихся в литературе сведений это обстоятельство можно объяснить прежде всего отсутствием фазовой калибровки линий связи и приемных антенн, без которой невозможны прецизионные фазовые измерения, а также несовершенством технической процедуры определения разности фаз сигналов. Использование радиоастрономических интерферометров делает фазометрические средства координатных измерений весьма эффективными.

Работы по созданию классических систем последовательного апертурного синтеза проводились в радиоастрономической обсерватории (РАО) НИРФИ “Старая Пустынь”. Были со-

зданы два радиоинтерферометра [12–14], работающих в режиме накопления слабых сигналов методом остановки фазы (апертурный синтез): с базой 417 м на частоте 540 МГц и с переменной базой 60–130 м на частоте 152 МГц (три антенны). Несмотря на то, что эти инструменты имеют ограниченные возможности, они позволили определить координаты естественных радиоисточников с погрешностью  $\sim 5''$ , что близко к пределу возможностей при данном отношении  $\lambda/B$ , где  $\lambda$  — длина волны,  $B$  — базовое расстояние интерферометра. Были также проведены измерения параметров траекторий низколетящих ИСЗ двухэлементным интерферометром. Проводилось математическое моделирование работы двух- и трехэлементных интерферометров по сигналам ИСЗ, показана возможность определения в реальном времени положения и траектории КА на околоземной орбите с точностями порядка долей угловой секунды инструментами с базами от десятков до сотен метров в рабочих диапазонах НИСЗ “ГЛОНАСС” и ряда геостационарных ИСЗ. В этом случае, точность абсолютной привязки положения ИСЗ зависит от точности геодезических координат приемных элементов интерферометра при применении малых антенн, например, системы “ГЛОНАСС”, существенно упрощающих и удешевляющих приемный комплекс (абсолютный метод). При необходимости привязки положения КА к внеземным опорным источникам (дифференциальный метод) необходимо использовать антенны с большей эффективной площадью для обеспечения уверенного приема слабых сигналов калибраторов.

Ниже рассматриваются особенности работы и устройства радиоастрономического интерферометра (как элемента системы апертурного синтеза) на примере инструментов НИРФИ и проводится анализ изменений традиционной методики записи и обработки данных при применении подобных инструментов для решения координатных и траекторных задач по искусственным объектам в ближнем и дальнем космосе.

## 1. ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ

Рассмотрим основные соотношения, необходимые при определении координат источника двухэлементным интерферометром. Для малобазовых интерферометров удобно вести рассмотрение в декартовой системе координат. Примем, что начало координат находится в точке пересечения осей восточной антенны, ось  $X$  ориентирована в направлении север-юг, ось  $Y$  — восток-запад, ось  $Z$  — в зенит (рис. 1).

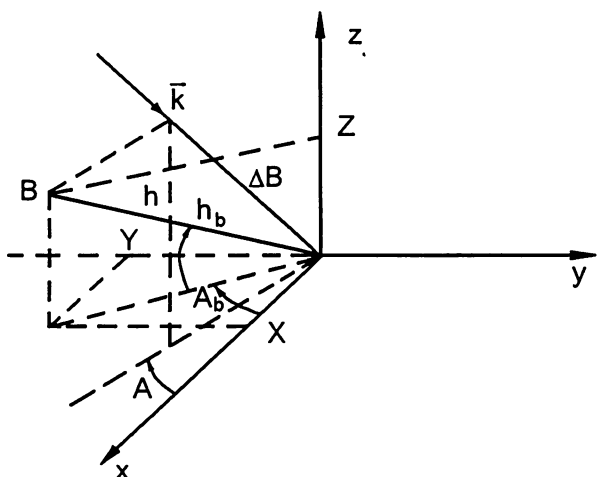


Рис. 1. Система координат ( $h$ ,  $A$  — высота и азимут источника).

Проекции базы  $X, Y, Z$  могут быть определены геодезическими методами, что важно для контроля результатов радиоастрономических наблюдений. При калибровке по космическим источникам (КИ) непосредственно измеряются параметры базы:

$$\begin{aligned}
 L &= Z \cdot \sin \varphi_g - X \cdot \cos \varphi_g \\
 M &= Z \cdot \cos \varphi_g + X \cdot \sin \varphi_g \\
 N &= Y
 \end{aligned} \tag{1}$$



в системе координат, повернутой относительно оси  $Y$  на угол  $\varphi_g$  (широта места), то есть ось  $L$  направлена на Полюс Мира. В этом случае разность фаз, измеряемая интерферометром, будет определяться следующим выражением:

$$\varphi = \varphi_{\text{инт}} + k(L \sin \delta + M \cos \delta \cos t + N \cos \delta \sin t), \quad (2)$$

где  $\delta$ ,  $t$  — склонение и часовой угол источника излучения,  $\varphi_{\text{инт}}$  — неконтролируемая системой внутренней фазовой калибровки разность электрических длин приемных трактов,  $k = 2\pi/\lambda$ . Часовой угол и прямое восхождение источника связаны соотношением  $t = s - \alpha$ , где  $s$  — местное звездное время. Задавая положение КИ как  $(\alpha_0 + \alpha')$ ,  $(\delta_0 + \delta')$ , где  $\alpha_0$ ,  $\delta_0$  — грубые значения координат, а  $\alpha'$ ,  $\delta'$  — искомые поправки, получим линейризованные соотношения для определения координат

$$a\alpha' + b\delta' = \varphi + \delta\varphi(\Delta\varphi_{\text{инт}}, \Delta L, \Delta M, \Delta N), \quad (3)$$

$$a = \cos \delta_0 \cdot (N \cos t_0 - M \sin t_0),$$

$$b = L \cos \delta_0 - \sin \delta_0 \cdot (N \sin t_0 + M \cos t_0)$$

$$\delta\varphi = -\Delta\varphi_{\text{инт}} - \Delta L \sin \delta_0 - \cos \delta_0 \cdot (\Delta N \sin t_0 + \Delta M \cos t_0),$$

$\Delta\varphi_{\text{инт}}$ ,  $\Delta L$ ,  $\Delta M$ ,  $\Delta N$  — погрешности в параметрах базы, возникающие в процессе наблюдений из-за нежесткости конструкции антенн, тепловых деформаций, неточности наведения, атмосферных эффектов.

Из уравнений (3) видно, что:

1) для получения поправок координат, то есть решения системы линейных уравнений с двумя неизвестными, необходимо как минимум два независимых замера;

2) параметры интерферометра — проекции базы и  $\varphi_{\text{инт}}$ , должны быть известны с необходимой точностью; калибровка по внеземным радиоисточникам дает относительную погрешность измерения базы порядка  $10^{-5} \div 10^{-7}$ , современные геодезические средства могут обеспечить при малых базах такую же точность;

3) точность измерений зависит от погрешности измерения разности фаз  $\varphi$  (то есть в первую очередь от отношения сигнал/шум) и стабильности параметров инструмента в процессе наблюдений или возможности их оперативного контроля;

4) в значении разности фаз  $\varphi$  должна быть исключена неопределенность  $2\pi n$ .

Каждое из этих условий влияет на общую структуру измерительной системы и на процедуру измерений; рассмотрим их подробнее.

1. При наблюдении КИ с постоянными  $\alpha$  и  $\delta$  проводится сеанс длительностью в несколько часов, во время которого набирается массив данных  $\varphi, a, b(t_i)$  при  $i \sim 10 \div 20$ ; решение системы линейных уравнений проводится методом наименьших квадратов по стандартной методике с вычислением всех погрешностей [15]. Подобная процедура обусловлена, в основном, слабым потоком излучения КИ. В принципе, в системах апертурного синтеза при большом объеме информации по множеству КИ при калибровке уточняются практически все параметры — проекция базы, координаты места установки, координаты источников [1], без линеаризации системы уравнений (2).

При наблюдении КА с переменными  $\alpha$  и  $\delta$  возможны два способа получения поправок:

а) одновременные измерения  $\varphi$  как минимум двумя интерферометрами с различными  $L, M, N$ ;

б) последовательные измерения фазы одним интерферометром и независимые одновременные измерения приращений  $\alpha$  и  $\delta$ , возникающих из-за движения КА, например, доплеровской навигационной системой.

2. Калибровка инструмента по внеземным источникам — определение параметров базы и непрерывный контроль их стабильности — обязательная процедура, от результатов которой зависит точность определения положения КА. Необходимо использовать КИ с малыми угловыми размерами или симметричной структурой, расположенных на небесной сфере как можно

более равномерно по  $\delta$ , и естественно, как можно более интенсивных. Все эти требования совместить сложно, поскольку они меняются в зависимости от длины волны  $\lambda$  и базы  $B$ , а интенсивность большинства радиоисточников крайне мала. С этой точки зрения наиболее существенным фактором является требование большой эффективной площади антенн интерферометра, в то время как прием сигналов КА можно вести на малые антенны. Это противоречие нивелируется тем, что сигналы КИ можно накапливать длительное время и вести обработку по большому массиву данных, но применение в подобных системах зеркальных антенн с диаметрами в несколько метров является практически обязательным.

В диапазоне  $10 \div 30$  см желательно применять антенны с диаметрами зеркал  $\gtrsim 10$  м при возрастании баз до 1 км и более. Если же при калибровке инструмента определять только его проекции базы и  $\varphi_{\text{инт}}$ , то можно проводить измерения на более длинных волнах относительно рабочих частот КА и применять антенны с меньшими диаметрами зеркал. Однако, наибольшая точность определения координат КА достигается при относительных измерениях по опорным источникам, которые существенно уменьшают влияние таких факторов, как нестационарность атмосферы, инструментальные погрешности, нестабильность параметров приемной аппаратуры, линий связи и т. д.; поэтому желательно проводить измерение фазы сигналов КА и КИ одним приемным комплексом.

3. Погрешность измерения разности фаз зависит от чувствительности приемника, интенсивности источника-калибратора (времени накопления сигнала), а также от условий распространения радиоволн в атмосфере. Прием сигнала на две антенны с соответствующей обработкой значительно снижает влияние атмосферы при небольших базах, но при базах  $> 1$  км влияние мелкомасштабных неоднородностей становится существенным фактором, не позволяющим проводить прецизионные измерения на высотах источника ниже  $20^\circ$ . Характеристики ат-

мосферы зависят от времени суток, сезона, от положения источника. Проведение измерений на нескольких частотах, инструментами с различными базами дает возможность в значительной степени учесть состояние атмосферы на пути распространения сигнала. Накопление этих данных позволит прогнозировать изменения разности фаз, вносимые средой распространения, и вносить соответствующие поправки, снижающие случайную погрешность измерений. Влияние факторов, вызывающих систематические погрешности, рассмотрено в п. 2.

4. Значительные сложности возникают при разрешении неопределенности  $2\pi n$  в значении измеряемой интерферометром разности фаз, возникающей из-за многолепестковости диаграммы направленности ( $n \cdot \lambda/B$ ). В радиоастрономии эта проблема решается либо возможностью длительных калибровочных измерений по определенным объектам, либо когда проводимые измерения уточняют параметры, уже косвенно измеренные с точностью, заведомо дающей значение фазы в пределах определенного лепестка диаграммы направленности. Устранить неопределенность фазы  $2\pi n$  можно при проведении измерений либо на двух частотах одновременно, либо несколькими интерферометрами с некратными базами.

Наиболее предпочтителен и логичен вариант уточнения положения КА при использовании орбитальных параметров, даваемых штатными системами слежения. Кроме того, ряд навигационных систем работают на двух частотах. Поэтому эта задача может представить значительные трудности только при требовании точностей определения координат  $< 0''$ ,1. В этом случае понадобится применение нескольких интерферометров с существенно различными базами от сотен или десятков метров до нескольких километров с различными ориентациями векторов базовых линий.

Для инструментов НИРФИ актуальной является разработка метода определения координат источника излучения с помощью одного двухэлементного интерферометра, поскольку оба

интерферометра РАО имеют ориентацию базы, близкую к направлению Восток – Запад. Если известны приращения координат  $\alpha$ ,  $\delta$  в единицу времени, то задача становится аналогичной задаче наблюдения источника с постоянными координатами, где проводится их уточнение по методике калибровки инструмента, описанной выше. Приращения координат с высокой точностью определяются штатными доплеровскими системами. Возможен и другой способ решения этой задачи.

Рассмотрим возможность применения двухэлементного радиоинтерферометра для координатных измерений в предположении, что движение источника излучения равномерно в течение сеанса измерений, т. е. его координаты  $(t, \delta)$  — часовой угол и склонение в экваториальной системе координат можно представить в виде

$$\begin{aligned}\delta(T) &= \delta_0 + \omega_\delta(T - T_0); \\ t(T) &= t_0 + \varepsilon(T - T_0) + \omega_t(T - T_0),\end{aligned}\quad (4)$$

где  $(\delta_0, t_0)$  — значения координат в момент времени  $T_0$  вхождения КА в диаграмму направленности антенн,  $(\omega_\delta, \omega_t)$  — приращения их в единицу времени,  $\varepsilon$  — угловая скорость вращения небесной сферы,  $T$  — декретное время. Тогда система уравнений для решения координатной задачи примет вид

$$\begin{aligned}k \left( L \sin \delta(T_i) + \cos \delta(T_i) \left( M \cos t(T_i) + N \sin t(T_i) \right) \right) - \varphi_i &= 0, \quad (5) \\ i &= 0, 1, 2, \dots, n, \quad n \geq 4.\end{aligned}$$

Здесь  $\varphi_i$  — разность фаз, измеренная по источнику с  $\delta$  в момент  $T_i$ . Считаем известными:  $\varphi_{\text{инт}}$  — разность электрических длин приемных трактов, величину базы  $B = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}$  и  $(\varphi_g, \lambda_g)$  — широту и долготу места установки интерферометра.

Поскольку число искомых неизвестных равно четырем  $(t_0, \delta_0, \omega_\delta, \omega_t)$ , то при четырех и более замерах фазы по сигналам КА может быть решена система уравнений (5) и найдены неизвестные параметры источника излучения.

Результаты применения данной методики в реальном эксперименте по ИСЗ типа “Цикада” подробно изложены в Части 2 данной работы.

Проведем некоторые оценки возможностей использования навигационных интерферометров. Примем за исходную оценку точности измеряемых угловых координат КА величину  $0''{,}1$ , считая высоту аппарата над поверхностью Земли  $\sim 20000$  км (это соответствует линейной погрешности  $\sim 10$  м). Исходя из сказанного выше радиоинтерферометрический комплекс позволяет следующее.

а) Проводить измерения угловых координат излучающего объекта; при этом:

— минимальная погрешность измерения углов  $\sigma_\theta$  оценивается как  $\sigma_\theta \sim \frac{\sigma_\varphi \lambda}{2\pi B}$ , где  $\sigma_\varphi$  — погрешность измерения разности фаз, определяемая чувствительностью системы и уровнем принимаемого сигнала; неточное определение  $\lambda$  и  $B$  обусловит, в основном, систематические погрешности измеряемых углов;

— при уровнях сигналов ИИСЗ на поверхности земли более 160 ДБВт  $\sigma_\varphi$  составит единицы градусов ( $< 5^\circ$ ) даже при небольших штатных приемных антеннах, значение  $\sigma_\varphi \sim 1^\circ$  можно считать предельно возможным из-за шумов аппаратуры, ионосферы, помеховой обстановки и точности системы фазовой калибровки, обычно ограниченной величиной  $2 \div 3^\circ$  при жестких требованиях радиоастрономических наблюдений;

— на рабочих частотах КНС “ГЛОНАСС” и среднеквадратичном отклонении (СКО) определения  $\sigma_\varphi$  порядка  $1 \div 2^\circ$  за время  $1 \div 2$  мин (50–100 замеров) при заданной погрешности определения направления на объект  $\sim 0''{,}1$  базовые расстояния интерферометрического комплекса должны быть в пределах 1–1,5 км;

— для получения полной информации о положении ИИСЗ необходимо измерить дальность до КА штатными радиотехническими средствами или измерять направление на источник одновременно с 2–3 пунктов.

б) Радиointерферометр определяет истинное направление на объект, поскольку регулярная рефракция не влияет на разность фаз принимаемых антеннами сигналов [1]; влияние атмосферы подавляется тем сильнее, чем меньше базовые расстояния между антеннами.

в) Первый отсчет углового положения на комплексе из двух интерферометров с примерно ортогональными базами теоретически может быть получен в реальном времени. Практически необходимо время для записи и обработки сигнала, а также накопление его в течение нескольких минут для уменьшения погрешности измерения фазы до предельного минимума и исключения случайных ошибок; т.о. время получения первого отсчета составит 1–10 минут в зависимости от условий приема сигнала, оптимальности программного обеспечения и быстродействия ЭВМ. Определение участков траектории ИСЗ одним двухэлементным интерферометром ведется после пролета КА угловых расстояний  $\sim 10 \div 20^\circ$ , что определяется алгоритмом последующей обработки. Для низколетящих объектов это время также составит 1–10 минут, что достаточно и для уменьшения  $\sigma_\varphi$ , и для вычисления отрезка траектории полета.

## 2. АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ РАЗНОСТИ ФАЗ СИГНАЛОВ

Точность определения параметров траекторий полета или координат КА при решении системы уравнений (3) зависит от ошибок определения величины разности фаз сигналов, которые включают в себя как погрешность измерения  $\varphi_i$  (случайные ошибки), так и ошибки, обусловленные характеристиками антенн, линий связи, приемной аппаратурой интерферометра и т.д., которые в большинстве случаев можно определить как систематические. Ошибки, вносимые в измеряемую фазу элементами интерферометрической системы, необходимо учитывать с помощью различного рода калибровок, нестандартных

методик в процедуре записи данных и проведения корректирующих операций при обработке результатов. Кратко рассмотрим ряд факторов, учет которых необходим для достижения предельных точностных возможностей фазометрического инструмента, каковым и является радиоастрономический интерферометр. Достаточно подробный анализ этих факторов для интерферометра дециметрового диапазона РАО “Ст.Пустынь” дан в работе [15].

## 2.1. Антенные факторы

К характеристикам антенн интерферометра, влияющим на точность координатных измерений, можно отнести конструктивную неидентичность двух приемных антенн, неточность наведения на источник (погрешности приводных систем), разгоризонтировку и дефекты монтажа, нежесткость конструкции зеркала.

### а) Неидентичность антенн.

Известно, что базовое расстояние интерферометра измеряется между точками пересечения осей вращения антенн. Если оси вращения не пересекаются, а расстояния между ними у двух антенн разные, то при слежении за источником база инструмента будет непрерывно меняться. Во избежание грубейших ошибок в результатах измерений зависимость величины базы от азимута и высоты источника должна быть известна и введена в алгоритмы расчетов корректирующих поправок разности фаз. Определить эту зависимость можно либо из конструкторской документации изготовителя антенн, что может привести к систематическим ошибкам в результатах, либо калибровкой базы по внеземным радиоисточникам с известными координатами. Вторым источником ошибок при неидентичных антеннах является неопределенность положения их фазовых центров и, следовательно, неизвестность величины  $\varphi_{\text{инт}}$ , которая определяется, в основном, калибровкой по радиоисточникам.



## б) Разгоризонтировка и дефекты монтажа.

Оба эти эффекта приводят к перекосу осей вращения антенны. При азимутально-угломестной монтировке (наиболее распространенной) отклонение азимутальной оси вращения от вертикали (разгоризонтировка) приводит к изменению расстояния между центрами вращения и зависимости базы от горизонтальных координат источника подобно той, что возникает при различных координатах мест установки антенн. Обычно конструктивно предусмотрена высокая точность горизонтирования крупных антенн, быстрый контроль и проведение регулярных процедур горизонтирования. Например, горизонтировка плоскости основания 7-ми метровых антенн интерферометра НИРФИ дециметрового диапазона может быть выполнена с погрешностью  $1'$ , что при высоте центра вращения над землей 6,2 м соответствует неопределенности его положения около 2 мм. Очевидно, что горизонтировку антенн следует проводить перед каждым сеансом наблюдений. Зависимостью базы от положения источника в этом случае можно пренебречь. Другим эффектом, к которому приводит перекося как азимутальной, так и угломестной осей, является ошибка наведения антенны на источник, которая в сумме с ошибками из-за неточности наведения следящей системы может оказывать влияние на фазу сигнала. Отсюда следует вывод, что углы перекося осей из-за дефектов монтажа конструкций должны быть меньше пределов точности следящей системы, что обычно выполняется.

Дефекты монтажа и допуски в изготовлении деталей опорно-поворотного устройства антенн приводят также к эффектам, подобным неидентичности конструкций. При этом практически невозможно выявить дефекты визуально (геодезическими методами), поскольку точка пересечения осей вращения обычно располагается внутри объема, занятого металлическими деталями. Установление этих дефектов возможно только внешней калибровкой инструмента. Например, расхождение в параметрах базы интерферометра НИРФИ (с идентичными прием-

ными антеннами), полученных геодезическими методами и калибровкой по радиоисточникам, в два – три раза превышало совокупные ошибки измерений.

в) Нежесткость конструкции антенны.

Жесткость конструкции антенны, т.е. способность сохранять геометрические параметры при колебаниях температуры (тепловые деформации) и при перераспределении весовых нагрузок во время вращения зеркала (механические деформации), является одной из важнейших характеристик антенной системы при фазометрических измерениях. Если пренебречь изменениями базы, смещение фокуса зеркала  $\Delta F$ , связанное с искажениями его формы при внешних воздействиях, приводит к прямопропорциональным  $\Delta F$  изменениям фазы сигнала (например, [16]). Расчет фазовых ошибок сигнала достаточно сложен и условен, т.к. требует задания моделей изменения геометрических параметров зеркала, которые не могут отразить полной картины искажений. Поэтому для прецизионных измерений необходимо получить зависимости изменения фазы сигнала от горизонтальных координат источника при разной внешней температуре, что достигается длительными сеансами калибровок по радиоисточникам в разные сезоны и время суток [17]. По данным экспериментов на инструментах НИРФИ наиболее сильное влияние на точность измерений фазы оказывают коротко периодические колебания внешней температуры, вызывающие прогиб листов обшивки рефлектора и, соответственно, изменение  $\varphi_{\text{инт}}$ . Для исключения возможных ошибок из-за этого эффекта проводилась отдельная обработка записей калибровочных радиоисточников, сделанных при разных внешних температурах.

г) Неточность наведения антенн.

Погрешность следящей системы обычно составляет незначительную долю от ширины главного лепестка диаграммы направленности и не приводят к изменению амплитуды сигнала, но при этом возникают два эффекта, приводящие к ошибке в фазе сигнала: 1) изменяется проекция базы в направлении на

источник, т. е. появляется дополнительная разность хода лучей, и 2) из-за наклона плоскости раскрыва антенны к плоскости синфазного фронта волны возникает дополнительная фазовая ошибка. В обоих случаях происходит запаздывание сигнала, обе фазовые ошибки имеют одинаковый знак. Обычно величина первой ошибки мала и ею пренебрегают. Вторая фазовая ошибка зависит от качества облучения зеркала, в основном, от формы фазовой диаграммы направленности. В идеальном случае с точечным облучателем фаза в главном лепестке ДН постоянна. Реальные облучатели дают спадающее распределение фазы: на рис. 2 показана экспериментальная фазовая ДН 7-ми метровой антенны на волне 10 см, измеренная по искусственному источнику излучения с фокусировкой; при паспортной точности наведения  $\pm 5'$  изменение фазы сигнала уже заметно (следует отметить, что фокусировка усиливает этот эффект).

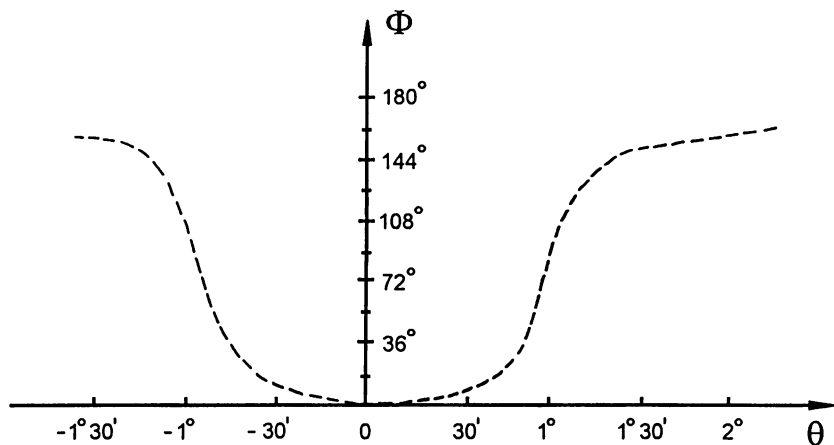


Рис. 2. Фазовая диаграмма 7-ми метровой антенны на частоте 3 ГГц.

При записи сигналов от быстролетающих объектов, когда не ведется слежение антеннами за КА, главным источником оши-

бок является неидентичность фазовых ДН обеих антенн хотя бы в пределах главного лепестка. Можно заключить, что для прецизионных измерений с остронаправленными антеннами необходима калибровка фазовых ДН антенн, которая может быть выполнена методом Смита [18] без дополнительных аппаратурных средств. При сопровождении источника со штатными точностями приводных систем фазовые флуктуации сигналов незначительны.

## 2.2. Аппаратурные факторы.

Влияние несовершенства исполнения различных элементов приемной системы на величину измеряемой разности фаз сигналов сказывается неодинаково. Рассмотрим эффекты, которые обычно не удается устранить и необходимо учитывать или корректировать при записи и обработке данных. Рассмотрение проведено для двухканального корреляционного приемника, выполненного по смешанной одно-двухполосной (ОП – ДП) схеме с двойным преобразованием частоты, применяемого в интерферометрах НИРФИ [12] (рис. 3а, б). Сочетание первого однополосного и второго двухполосного преобразований позволяет использовать различные положительные качества двух способов приема [19]: простоту выполнения фазовых операций (ОП), сравнительную легкость реализации переменных линий задержки и перемножителя и независимость величины ступеней задержки от промежуточной частоты (ДП).

### а) Неравенство электрических длин плеч интерферометра.

Для малобазовых интерферометров со связанными элементами (с передачей общего гетеродинного сигнала к смесителям) одной из основных проблем является обеспечение фазовой стабильности линий связи, по которым передаются частоты гетеродина и промежуточная. Кроме создания специальных термостабилизированных галерей для канализирующих трактов в радиоастрономической практике обязательно применение различного рода систем фазовой калибровки или контроля электри-

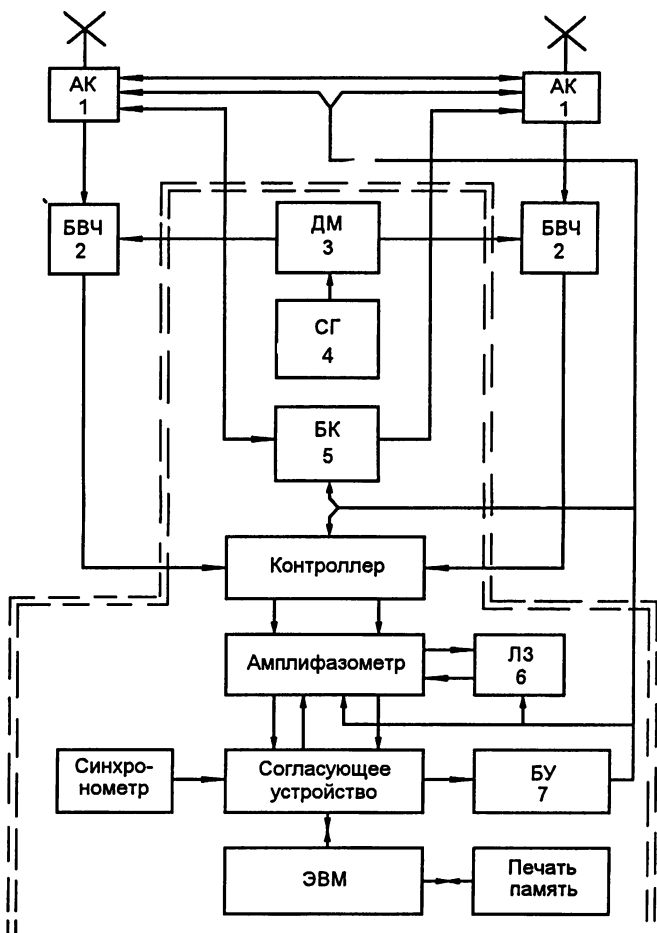


Рис. 3а. Блок-схема приемной аппаратуры интерферометра.

1 — антенные коммутаторы; 2 — блоки высокой частоты; 3 — делитель мощности гетеродина; 4 — синхронизованный гетеродин 600 МГц; 5 — блок калибровки; 6 — линия задержки; 7 — блок управления режимами работы.

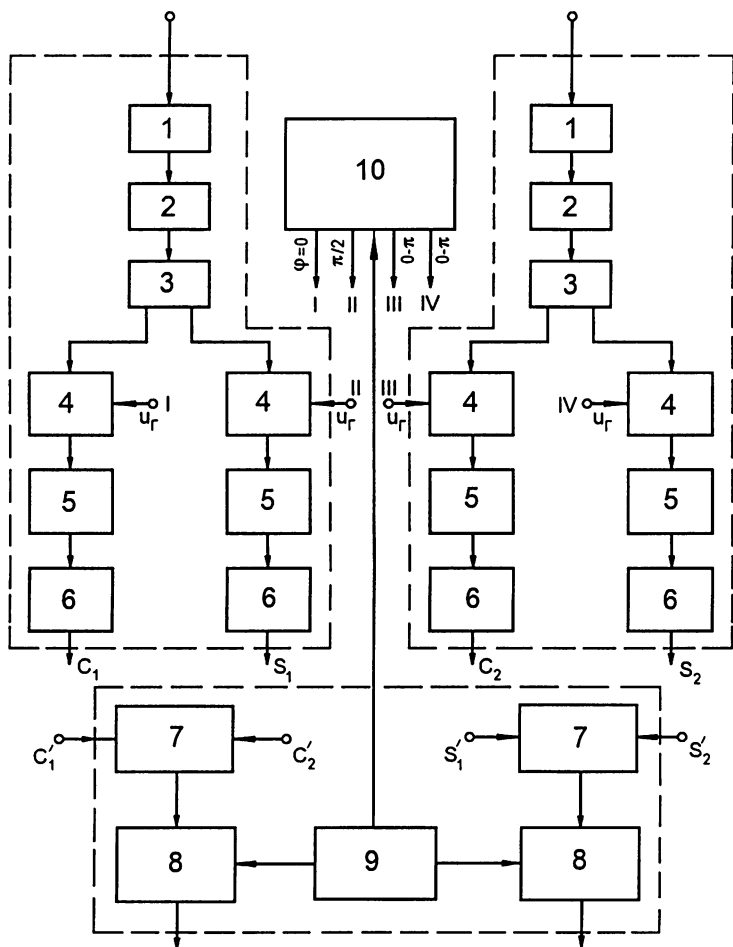


Рис. 36. Блок-схема амплифазометра.

1 — аттенюаторы  $0 \div 30$  дБ; 2 — транзисторные УПЧ (60 МГц); 3 — разветвители; 4 — смесители; 5 — фильтры нижних частот  $0 \div 5,5$  Мгц; 6 — эмиттерные повторители; 7 — перемножители; 8 — гетеродинные фильтры; 9 — генераторы опорных сигналов; 10 — гетеродин 60 МГц.

ческих длин трактов [1, 20]. Точность подобных систем в значительной мере определит возможности инструмента при решении тех или иных задач, а также сложность аппаратуры и, соответственно, надежность и стоимость комплекса. Очевидно, что более предпочтительно использовать схемы контроля трактов, которые используют основную приемную аппаратуру интерферометра. В этом случае контролируются все элементы приемных трактов, включая активные электронные схемы корреляционного радиометра, и не требуется создание дополнительных блоков приемника. Примером системы фазовой калибровки в чистом виде является схема Моримото [21], примененная в радиогелиографе в Кулгуре, и взятая прототипом для систем фазовой калибровки интерферометров НИРФИ (рис. 4). По результатам проведенных экспериментов данная схема обеспечивает точность определения разности электрических длин передающих трактов  $2 - 3^\circ$  при длинах плеч около 250 м. При более тщательном исполнении коммутационных элементов схемы возможно улучшение точности до  $1 - 2^\circ$ , что может потребоваться при работе по КА.

Одной из проблем при калибровке трактов является выполнение требования подачи калибровочного сигнала в точку тракта, как можно более близкую к облучателю антенны. Отрезки трактов, не охваченные внутренней калибровкой, внесут дополнительный вклад в величину  $\varphi_{\text{инт}}$  вместе с факторами, связанными с жесткостью антенны. В зависимости от конструкции облучающих систем на радиотелескопах НИРФИ длина неконтролируемых фазовой калибровкой отрезков трактов варьировалась от 0,5 до 8 м, что при колебаниях внешней температуры во время сеанса наблюдений определяло периодичность калибровки.

#### б) Влияние коэффициентов усиления каналов интерферометра.

Изменение (дрейф) общего коэффициента усиления приведет к ошибке в измеряемой амплитуде сигнала и изменению погрешности фазы, в основном, при длительных циклах наблюде-

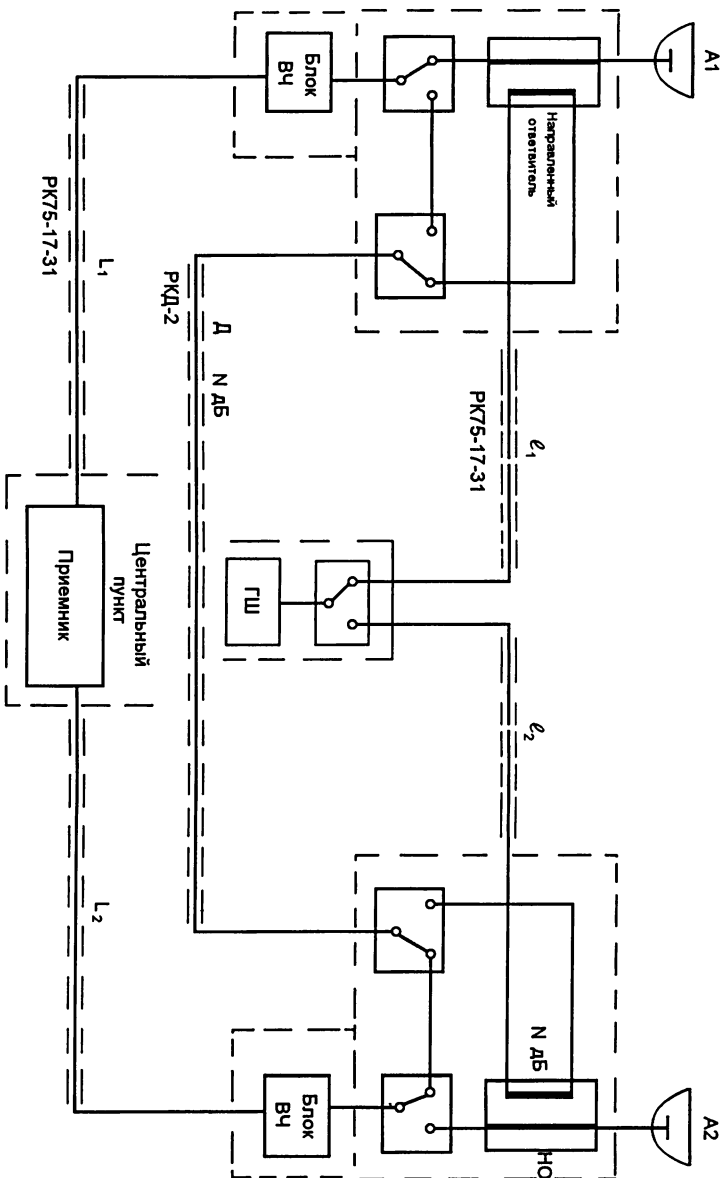


Рис. 4. Блок-схема системы фазовой калибровки



ний. При калибровке усиления по внутреннему (ГШ, ГСС) или внешнему стабильному источнику перед измерением сигналов КА практически исключаются ошибки из-за этого фактора. Более важно неравенство коэффициентов SIN- и COS-каналов радиометра, которое непосредственно отражается на амплитуде и фазе сигнала, поскольку

$$A_c = \sqrt{C^2 + K^2 S^2}, \quad \varphi_c = \operatorname{arctg} \left( K \frac{S}{C} \right),$$

где  $K = C_0/S_0$  — отношение коэффициентов усиления каналов. Если  $K \neq 1$ , то амплитуда сигнала  $A_c$  будет “модулирована” с частотой, равной удвоенному периоду интерференции, и результирующее среднее значение будет занижено. Ошибка в фазе достигнет максимума при  $S = C$ , например, для  $K = 0,9$  ошибка в фазе составит примерно  $3^\circ$ , спад амплитуды будет достигать 10%. Отношение коэффициентов усиления каналов также определяется калибровкой, а поправки в фазу вводятся для каждого конкретного измерения.

в) Сдвиг фаз в каналах интерферометра.

Сдвиг фаз в каналах  $\chi$ , т. е. отличие разности фаз синусного и косинусного каналов от  $90^\circ$ , также как неравенство коэффициентов усиления, приводит к неверному определению  $A_c$  и  $\varphi_c$  в каждом конкретном случае. Соотношения для коррекции измеренных величин имеют вид:

$$A_c = \sqrt{C^2 + S^2 - 2CS \sin \chi},$$

$$\varphi_c = \operatorname{arctg} \left( \frac{S/C - \sin \chi}{\cos \chi} \right),$$

где  $\chi$  — положительная добавка в SIN-канале. Однако, чтобы определить величину  $\chi$  требуются дополнительные блоки системы калибровки, которые затрудняют проведение оперативного контроля  $\chi$ . Поэтому сдвиг фаз в каналах необходимо определять и устранять в ходе создания аппаратуры. Наличие величины  $\chi$  в процессе измерений в режиме апертурного синтеза

можно установить по амплитуде сигнала  $A_c$ , которая будет “модулирована” с частотой, равной удвоенному периоду интерференции. При  $\chi = 1^\circ$  спад амплитуды будет достигать 3,5%; фаза рассчитывается с максимальной ошибкой, равной примерно  $\chi$ , при  $S = 0$ .

г) “Нулевые” уровни выходных каскадов каналов приемника.

“Нулевые” уровни, т. е. усредненные за определенный промежуток времени значения выходных сигналов каналов при отсутствии сигнала на входе приемника, в силу ряда причин могут не равняться нулю и произвольно изменяться со временем, в том числе от высоты источника над горизонтом при работе на низких частотах (метровый диапазон). Это обстоятельство может вносить существенные ошибки в значения измеряемой фазы; поэтому определение “нулевых” уровней  $\Delta_C$  и  $\Delta_S$  обязательно при калибровке, а коррекция измеряемых значений SIN- и COS-каналов  $(C + \Delta_C)$  и  $(S + \Delta_S)$  должна проводиться для каждого измерения. Чтобы максимально уменьшить влияние дрейфа и ошибок измерения нулей  $\Delta_C$  и  $\Delta_S$ , в системах апертурного синтеза время накопления сигнала берется кратным периоду интерференционной картины. Этот же прием необходимо применять при записи и обработке сигналов КА.

д) Ошибки линий задержки.

При выполнении линий задержки в виде набора отрезков кабелей отключенные цепи заменяются компенсирующими элементами с таким же затуханием. Очевидно, что точно компенсировать затухание сигнала в рабочем канале практически невозможно, и кроме того, различие частотных характеристик рабочих и компенсирующих цепей приводит к фазовым сдвигам сигналов при переключении каналов задержки. Поэтому линии задержки должны быть прокалиброваны, а соответствующие поправки вносятся в амплитуду и фазу сигнала. Цифровые линии задержки лишены этих недостатков.

При двухполосном приеме с введением временной задержки по второй промежуточной частоте, требования к фазовым ис-

кажениям сигнала существенно упрощаются, и точность выполнения ступеней задержек может быть невысока.

д) Несимметричность полосы пропускания приемника.

Частотная зависимость спектра излучения источника.

Представим выходной сигнал интерферометра в виде

$$w \sim \frac{1}{\Delta f} \int_{f_0 - \Delta f/2}^{f_0 + \Delta f/2} \Gamma(f) \Pi(f) \cos\left(\frac{2\pi}{c} f \Delta D_0\right) df, \quad (6)$$

где  $\Pi(f)$ , — частотная характеристика приемника,  $\Gamma(f)$  — частотный спектр излучения источника,  $\Delta D_0$  — дискрет линии задержки,  $c$  — скорость света. Отличие от константы любой из этих функций в пределах полосы пропускания приведет к изменению амплитуды и фазы выходного сигнала. Рассмотрим для примера влияние несимметричности функции  $\Pi(f)$  относительно центральной частоты  $f_0$ , считая  $\Gamma(f)$  постоянной и полагая  $\Pi(f)$  линейно зависящей от частоты:  $\Pi(f) \sim a + bf$ . Тогда из (6) получим

$$\begin{aligned} w &\sim A \cos\left(\frac{2\pi}{c} \Delta D_0 f_0 + \xi\right), \\ A^2 &= a^2 \frac{\sin^2 x}{x^2} + \left(\frac{b \Delta f}{x}\right)^2 \left(\frac{\sin x}{x} - \cos x\right)^2, \\ \operatorname{tg} \xi &= \frac{b \Delta f}{ax} (1 - x \operatorname{tg} x), \quad x = \frac{2\pi}{c} \Delta D_0 \Delta f. \end{aligned} \quad (7)$$

Так как форма полосы пропускания не бывает идеальной, оценить величину сдвига фазы можно только после измерения реальной амплитудно-частотной характеристики приемника. Влияние несимметричности полосы пропускания эквивалентно ошибкам координат источника, устраняется фазовой калибровкой, охватывающей все активные элементы приемного тракта.

Частотную зависимость спектра излучения источника можно рассматривать как дополнительную функцию полосы пропускания. В радиоастрономии с непрерывным спектром  $\Gamma(f) \sim$

$\sim f^{-\gamma}$ , где  $\gamma$  — спектральный индекс источника. В этом случае  $\Gamma(f) = \Gamma(f_0)(1 - \gamma f'/f_0)$ , где  $f' = f - f_0$ , и амплитуда и фаза выходного сигнала будут отличаться от расчетных на величины, определяемые соотношениями, аналогичными (7). Так как  $\gamma < 2$ , а  $f'/f_0 \sim 10^{-3}$ , искажение сигнала пренебрежимо мало, что важно при выполнении внешней калибровки инструмента по радиоисточникам. При последующей работе по сигналам КА с сплошным спектром важно как постоянство спектра излучения источника, так и постоянство или плавность изменений амплитудно-частотной характеристики.

е) Частотные характеристики передающих трасс.

Поскольку затухание в трактах и их электрическая длина зависят от частоты, при прохождении широкополосного сигнала через длинную линию будут иметь место два эффекта:

— искажение амплитудно-частотного спектра сигнала, которое можно рассматривать и учитывать как несимметричность полосы пропускания приемного тракта; при трассах длиной более километра возникает необходимость установки корректоров спектра сигнала и усилителей;

— из-за различия характеристик отдельных отрезков трактов возникает дополнительная разность фаз сигналов от двух антенн, которая является составной частью разности электрических длин трактов интерферометра.

ж) Неточность определения частоты сигнала.

Неточное определение частоты принимаемого сигнала (центральной) приведет к систематической ошибке в измеренных координатах источника излучения. Для источников со сплошным спектром излучения рабочая частота инструмента определяется как суперпозиция частот первого и второго гетеродинов и зависит от стабильности задающих генераторов. Для малобазовых систем достижение требуемой стабильности не составляет больших трудностей. Работа по подвижному источнику монохроматического сигнала нежелательна, поскольку требует учета доплеровского эффекта, что приведет к дополнительному источнику ошибок.

### 2.3. Погрешности в параметрах инструмента

К этим факторам относятся, кроме рассмотренной выше  $\varphi_{\text{инт}}$ , ошибки в проекциях базы и координатах места установки интерферометра.

#### а) Ошибки проекций базы.

Как видно из соотношения (2), ошибки в величинах проекций базы эквивалентны ошибке измерения разности фаз сигналов и вносят погрешность в фазу, зависящую от склонения и часового угла источника. Во избежание систематических ошибок в расчетных координатах объекта, как уже отмечалось, желательно проводить измерения проекций базы по внеземным радиоисточникам, причем чем большее число калибраторов используется, тем точнее результат. К калибровочным источникам можно отнести только те объекты, которые для инструмента с определенными параметрами являются точечными или имеют симметричную структуру распределения радиояркости. Как показывает практика, таких источников с достаточно большой интенсивностью излучения крайне мало, а для интерферометров с базами в несколько сотен метров и более в коротком дециметровом диапазоне большинство подходящих радиоисточников слабы и калибровка возможна при антеннах с диаметрами зеркал более 10–15 м. В работе [15] разработаны методы калибровки интерферометров с невысокой чувствительностью по одному - двум источникам, подробно рассмотрены условия достижения минимальной погрешности измерения проекций  $X, Y, Z$  от параметров источников и графика наблюдений. Составлен также каталог [22] наиболее мощных радиоисточников, пригодных для калибровки небольших инструментов; в нем собраны сведения о потоках, координатах, структуре, поляризационных характеристиках и спектральном индексе в диапазонах рабочих частот систем апертурного синтеза, для боль-

шинства источников приведены радиокарты на различных частотах.

б) Ошибки координат места установки.

Широта места установки интерферометра, а точнее центра базы, влияет на результат измерения фазы, если измерялись проекции  $X, Y, Z$  геодезическими методами, поскольку в соотношениях перехода к проекциям  $L, M, N$  (1) используется величина  $\varphi_g$ . При калибровке по радиоисточникам широта места в расчетах не участвует. Значение долготы центра базы  $\lambda_g$  входит в величину часового угла источника наряду с прямым восхождением и временем  $T$  и непосредственно влияет на точность измерения координат объектов:

$$t = (1 + \mu)(T - T_k),$$

где  $T_k = 3^h + \frac{1}{1 + \mu} (\alpha - \lambda_g - S_0)$  — время кульминации источника,  $S_0$  — звездное время в гринвичскую полночь,  $\mu = 0,00273791$  — астрономическая постоянная. Очевидно, что погрешность измерения долготы должна быть такой же или меньше, чем погрешность измерения времени.

В работе [23] предложен способ определения поправки к часовому углу радиоисточника при методически простых измерениях фазы в моменты  $t = 0$  или  $\pm\pi/2$ . Если считать известными прямое восхождение источников и время измерений, то этот достаточно простой способ дает возможность непосредственного точного определения долготы, а также её оперативного контроля при смещении Полюса Земли.

На точность интерферометрических измерений оказывают влияние также такие эффекты, как точность определения времени, рефракция, абберрация, прецессия, нутация, собственное движение Полюса Земли и некоторые другие. Точность определения времени зависит от организации приема сигналов государственной Службы времени на пункте приема и может быть получена в соответствии с заданными требованиями. Осталь-

ные факторы обычно учитываются при расчетах координат радиоисточников на дату проведения калибровочных наблюдений.

### 3. АНАЛИЗ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЙ КООРДИНАТ ИСТОЧНИКОВ

Из вышесказанного следует, что измерения координат источников излучения можно проводить двумя способами, которые условно можно назвать абсолютным и дифференциальным.

#### 3.1. Абсолютный метод

Если антенная система интерферометрического комплекса состоит из небольших слабонаправленных элементов или приемная аппаратура не обладает необходимой чувствительностью для измерения сигналов от внеземных радиоисточников, т. е. внешняя калибровка по естественным источникам излучения с известными координатами невозможна, то измеряемое положение КА и ИСЗ будет определяться в геоцентрической системе координат, не связанной с небесными телами, положение которых на длительных промежутках времени фиксировано. Будем называть это положение абсолютным, поскольку оно жестко привязано к местоположению измерительного инструмента.

Перечислим все основные источники ошибок результирующих значений координат измеряемого объекта, не считая аппаратных, являющихся общими для любых методов измерений.

— Проекция базы в горизонтальной системе координат определяются геодезическими средствами, точность которых в настоящее время сравнима с радиоастрономической калибровкой. Однако, положение реперных точек на антеннах с большой степенью вероятности не совпадет с истинной точкой отсчета базы (см. п. 2.1), что приведет к появлению систематических ошибок в измеряемых координатах объекта. То же самое относится к  $\varphi_{\text{инт}}$  (считаем наличие системы внутренней фазовой

калибровки обязательным). Кроме того, регулярный, а тем более оперативный контроль проекций базы, а тем более  $\varphi_{\text{инт}}$ , с помощью геодезических приборов нереален и малоэффективен из-за длительности процедуры.

Возможен вариант создания системы внешней фазовой калибровки для контроля  $\varphi_{\text{инт}}$  по искусственным источникам излучения [24], что приведет к сильному усложнению и удорожанию приемного комплекса, поскольку в равнинной местности потребует установки калибровочных вышек, искусственных эталонов излучения и т. д.

— Координаты места установки интерферометра определяются также геодезическими методами с тем же классом точности, что и параметры базы; ошибки измерений войдут в систематическую погрешность результата.

— Турбулентность атмосферы, наличие горизонтальных градиентов полного электронного содержания ионосферы прямыми методами неконтролируемы и будут существенно влиять на ошибки измерений, особенно с увеличением баз интерферометров.

При постоянстве или корректном учете изменений параметров базы и координат места влияние вносимых систематических ошибок несущественно, если проводится сравнение координат разных объектов или определение положения потребителей, например, КНС, ведется в системе координат, привязанной к измерительному инструменту. Однако, в масштабах Земли или континента данная задача по сложности становится сравнимой с измерением координат. Тем не менее, считаем в этом методе основным источником ошибок атмосферную нестабильность.

### 3.2. Дифференциальный метод

Основа дифференциальных методов — относительные измерения положения двух источников излучения: исследуемого и опорного. В нашем случае эту задачу можно рассматривать более широко: по опорному источнику проводится внешняя



фазовая калибровка для исключения влияния на измеряемую фазу всех возможных паразитных эффектов. Действительно, калибровка параметров базы по опорным радиоисточникам (по соотношению (2)) существенно повышает точность определения положения КА в небесной системе координат, поскольку ошибки калибровки исключаются (в соотношении (3)). В работе [15] показано, что погрешность измерений положения центра тяжести излучения ряда источников относительно опорных достигала предела возможностей интерферометра дециметрового диапазона (3'') несмотря на то, что угловые расстояния между исследуемыми и опорными источниками составляли десятки градусов (несколько размеров диаграмм направленности антенн). На этом же инструменте получено, что величина проекций базы достаточно стабильна в течение года (антенны с 7-ми метровыми зеркалами серийного производства). Для достижения наивысшей эффективности дифференциального метода, когда предельно уменьшается влияние нестабильности атмосферы, необходимо проводить калибровку инструмента до и после измерений сигналов от КА по опорному источнику, как можно ближе расположенному к трассе полета КА. Это обстоятельство требует создания каталога источников, которые могут применяться в качестве калибраторов для данного инструмента, и разработки графиков проведения наблюдений. Применение крупных антенн приводит к дополнительным источникам ошибок (см. п. 2.1), которые приходится контролировать в процессе измерений, но это единственный способ повысить точность результата до возможного предела и получать координаты объектов в стабильной небесной системе координат.

## Литература

1. Томпсон Р., Моран Дж., Свенсон Дж. Интерферометрия и синтез в радиоастрономии. — М.: Мир, 1989.

2. Edwards C.D. Goldstone Intracomplex Connected Element Interferometry // TDA Prog. Report. 1990. 42-101. P. 1.
3. Дугин Н. А., Кузнецова И. П. Определение координат космических аппаратов и положения потребителей космических навигационных систем с помощью радиointерферометров со связанными элементами // Труды конференции "Современные проблемы и методы астрометрии и геодинамики". — С.-Петербург, 1996. С. 277–281.
4. Дугин Н. А., Кузнецова И. П., Разин В. А., Смышляева Г. Г., Старостин В. Н. Определение фрагментов траектории полета КА радиointерферометром со связанными элементами // Труды конференции "Радиолокация, навигация, связь" RLNC-99. — Воронеж, 1999.
5. Беагон В. С., Дугин Н. А., Романычев А. А., Шнырова Е. Ю. Применение фазостабильных радиointерферометров для определения расстояний и местоположения на поверхности Земли // Сб. докладов Всесоюзной НТК "Современные проблемы фазоизмерительной техники и её применения". — Красноярск, 1989. С. 184.
6. Brown D. W. etc. Interagency telemetry arraying for Voyager-Neptune encounter, TDA Progress Report 42-102, august 15, 91-113, 1990.
7. Добрушский Л. А., Дугин Н. А., Разин В. А., Смышляева Г. Г. К вопросу об учете влияния ионосферы на навигационные измерения // Труды конференции "Современные проблемы и методы астрометрии и геодинамики". — С.-Петербург, 1996. С. 282-288.
8. Глобальная спутниковая радионавигационная система (ГЛОНАСС) / под ред. В. Н. Харисова, А. И. Перова, В. А. Болдина. — М.: ИПРЖР, 1998.

9. Edwards C. etc. A demonstration of real-time connected element interferometry for spacecraft navigation // AAS 91-517, JPL, California, 1990.
10. Thurman S. W. Information Content of a Single Pass of Phase-Delay Data from a Short Baseline Connected Element Interferometry. TDA Prog. Report, 1990, 42-101, 26.
11. Сетевые спутниковые радионавигационные системы / под ред. В. С. Шебшаевича. — М.: Радио и связь, 1993.
12. Беагон В. С., Дугин Н. А., Романычев А. А., Семенова Л. Р., Турчин В. И., Цейтлин Н. М. Система апертурного синтеза НИРФИ дециметрового диапазона // Изв. ВУЗов. Радиофизика. 1983. Т 26. N 11. С. 1420.
13. Беагон В. С., Дугин Н. А., Романычев А. А., Семенова Л. Р., Турчин В. И., Цейтлин Н. М. Двухэлементный радиointерферометр НИРФИ, предназначенный для работы в системе апертурного синтеза // Препринт N 143. — Горький, НИРФИ, 1980.
14. Дугин Н. А., Добрушский Л. А., Кузнецова И. П., Вьюгин В. Д. Трехантенная система апертурного синтеза метрового диапазона // Тезисы докладов XXVI Радиоастрономической конференции. — С.-Петербург, 1995. С. 365.
15. Дугин Н. А. Разработка и исследование двухэлементной системы апертурного синтеза. Кандидатская диссертация. — Горький, 1983.
16. Дугин Н. А., Дмитренко Д. А. К вопросу о распределении поля в районе фокуса параболоида при расположении источника в зоне Френеля // Изв. вузов. Радиофизика. 1976. Т. 19. N 7. С. 1031–1046.
17. Брейсуэлл Р. Н. и др. Станфордский пятиэлементный радиотелескоп // ТИИЭР. 1973. Т. 61. N 9. С. 103–114.

18. Методы измерения характеристик антенн СВЧ / под ред. Н. М. Цейтлина. — М.: Радио и связь, 1985.
19. Христиансен У., Хегбом И. Радиотелескопы. — М.: Мир, 1972.
20. Напьер П. Дж., Томпсон А. Р., Экерс Р. Д. Большая антенная решетка: Конструкция и характеристики современного радиотелескопа апертурного синтеза // ТИИЭР. 1983. Т. 71. N 11. С. 78–111.
21. Morimoto M. // *Electr. Letters*. 1965. V. 1. N 7.
22. Кузнецова Н. А., Дугин Н. А. Каталог радиоисточников для антенных и интерферометрических измерений. — Горький: НИРФИ, 1988.
23. Dugin N. A. Determination of an Hour Angle Correction of a Point Radio Source by a Radio Interferometer with Connected Elements // *IEEE AP-S Inter. Simp. and URSI Radio Sci. Meeting*. — Kanada: Montreal, 1997.
24. Беагон В. С., Дугин Н. А. О фазовой калибровке малобазовых радиointерферометров // Сб. трудов ОКБ МЭИ “Радиотехнические тетради”. 1995. N 1.

ДУГИН Николай Александрович  
КУЗНЕЦОВА Ирина Павловна  
РАЗИН Владимир Андреевич  
СМЫШЛЯЕВА Галина Георгиевна

ПРИМЕНЕНИЕ МАЛОБАЗОВЫХ РАДИОАСТРОНОМИЧЕСКИХ  
ИНТЕРФЕРОМЕТРОВ ДЛЯ КООРДИНАТНЫХ И ТРАЕКТОРНЫХ  
ИЗМЕРЕНИЙ

Часть 1

---

Подписано в печать 25 05.99 г. Формат 60 × 84/16.  
Бумага писчая. Печать офсетная. Объем 2,1 усл. п. л.  
Тираж 50. Заказ 5482.

---

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