

Научно-исследовательский радиофизический институт
Министерства образования Российской Федерации

Препринт № 479

**МАЛОБАЗОВЫЕ РАДИОИНТЕРФЕРОМЕТРЫ
НИРФИ**

Н. А. Дугин
В. А. Разин

Нижний Новгород, 2003

Дугин Н. А., Разин В. А.

Малобазовые радиointерферометры НИРФИ.

Препринт №479. — Нижний Новгород: НИРФИ, 2003. 48 с.

УДК 520.274

Приведены основные результаты многолетних исследований, выполненных на радиointерферометрах в радиоастрономической обсерватории НИРФИ “Старая Пустынь”. На основе этих результатов рассматриваются возможности применения малобазовых интерферометров в таких прикладных задачах, как оперативная калибровка инструментов, суммирование площадей разнесенных антенн, мониторинг состояния ионосферы, повышение эффективности работы глобальных космических навигационных систем.

1. ВВЕДЕНИЕ

В 1970–1980-х годах в Радиоастрономической обсерватории (РАО) Научно-исследовательского радиофизического института (НИРФИ) “Старая Пустынь” (Арзамасский район Нижегородской области) были разработаны и введены в действие двухэлементный интерферометр дециметрового диапазона, как элемент системы апертурного синтеза [1, 2], и трехэлементная система поляризационного апертурного синтеза метрового диапазона [3]. Созданные инструменты имеют следующие параметры:

1.1. Радиointерферометр дециметрового диапазона:

- антенны параболические полноповоротные с диаметром зеркал 7 м;
- расстояние между антеннами 417 м, ориентация базы близка к линии Восток-Запад;
- рабочая частота 540 МГц;
- приемник корреляционный супергетеродинный с квадратурным выходом с двойным преобразованием частоты, выполненный по смешанной одно–двухполосной схеме, полоса частот 5,5–10 МГц, первая промежуточная частота 60 МГц, вторая — 2,5–5 МГц; первое преобразование частот однополосное с подавлением зеркального канала фильтром, второе преобразование — двухполосное с сохранением обоих каналов приема;
- чувствительность 0,3 К при постоянной времени 1 с, чувствительность по потоку ~ 40 Ян;
- погрешность системы фазовой калибровки порядка 2–3°;
- ошибка определения угловых координат 2" при ошибке измерения фазы 2° (имеется в виду минимальное изменение одной из координат источника излучения при указанном изменении разности фаз принимаемых сигналов).

1.2. Радиointерферометры метрового диапазона:

- антенны параболические полноповоротные с диаметром зеркал 14 м;
- расстояние между антеннами 15–130 м, ориентация баз близка к линии Восток–Запад;
- рабочая частота 152 МГц;
- приемник четырехканальный корреляционный супергетеродинный с квадратурным выходом (по схеме, аналогичной приемной системе дециметрового диапазона), полоса частот 2 МГц, первая промежуточная частота 45 МГц, вторая — 2 МГц;
- чувствительность 0,7 К при постоянной времени 1 с;
- погрешность системы фазовой калибровки порядка 2° ;
- ошибка определения угловых координат $40''$ при ошибке измерения фазы 2° .

В течение ряда лет на этих радиointерферометрах отработывалась техника создания приемной аппаратуры [4–6] (в том числе цифровые варианты корреляторов и линий задержки), систем и методов фазовой калибровки [7], проводилась автоматизация дистанционного управления антеннами и приемной аппаратурой [8], отработывались варианты измерительно-вычислительных комплексов на базе ЭВМ различных поколений. Для работы с интерферометрами разрабатывались математическое и программное обеспечение как для съема и первичной обработки данных, так и для решения различных научных и прикладных задач; были составлены каталог радиостанций и база данных (в печатном и электронном виде) для антенных и интерферометрических измерений, учитывающие особенности технических характеристик небольших инструментов [9–12].

При вводе интерферометров в действие большое внимание уделялось их калибровке: определению длин проекций базы в направлениях восток–запад, север–юг, зенит, координат места установки антенн, дефектов монтажа антенн. Исходя из возможностей инструментов, совершенствовались известные спо-

собы калибровки и разрабатывались новые, позволявшие проводить оперативный контроль состояния инструмента по наблюдениям одного-двух источников [2, 13, 14]. Модификации этих методов позволяют проводить прецизионные геодезические измерения (определять географические координаты реперных точек на поверхности земли и расстояния между ними [15]), а также выполнять траекторные, координатные и навигационные измерения космических аппаратов и ИСЗ.

В середине 90-х годов совместно с сотрудниками лаборатории НИРФИ “Зименки”, отделов РСДБ и солнечной радиоастрономии НИРФИ на интерферометре дециметрового диапазона проведены исследования кратковременных солнечных вспышек (“спайков”), показавшие возможность регистрации интерферометрического сигнала от источников спайкоподобных солнечных всплесков миллисекундной длительности [16, 17].

В это же время на инструменте метрового диапазона проведена серия поляризационных измерений галактического радиоизлучения, а также ряда радиоисточников для отработки процедуры калибровки базы интерферометра на низкой частоте, имеющей определенные особенности при приеме сигналов в этом диапазоне [18]. В последнем случае рабочая частота инструмента была выбрана в диапазоне радиосигналов навигационных ИСЗ типа “Цикада”; были сделаны записи сигналов от ИСЗ, которые позволили получить экспериментальные данные для решения задачи траекторных определений. Исследовалось также влияние ионосферы на работу радиоинтерферометрических систем; показана целесообразность применения малобазовых интерферометров для мониторинга волновых возмущений ионосферы [19–22].

Актуальной задачей в радиоастрономии и антенной технике является увеличение эффективной площади приемной антенны. Системы апертурного синтеза позволяют фазировать и суммировать сигналы разнесенных антенн в реальном времени и, таким образом, получать эквивалентную апертуру большей эф-

фективной площади. Совместно с пунктами дальней космической связи была проведена разработка блок-схемы и процедуры суммирования для решения вопроса объединения наиболее крупных антенн этих пунктов в единый приемный комплекс. Мачетные испытания основных элементов этой разработки проведены на интерферометре НИРФИ дециметрового диапазона. Полученные результаты позволили разработать схемы сложения сигналов трех 14-метровых антенн РАО “Старая Пустынь” для получения эквивалентной антенны с диаметром зеркала порядка 25 м [23].

Совместно с сотрудниками ЦУП-М ЦНИИМАШ прорабатывалась задача повышения эффективности космических навигационных систем (КНС) “ГЛОНАСС” и GPS с помощью интерферометрических приемных комплексов. Показано, что интерферометрический комплекс в составе наземных контрольно-корректирующих навигационных станций позволит измерять положение любого видимого НИСЗ с эфемеридной точностью практически в реальном времени и осуществлять непрерывный контроль целостности данного созвездия НИСЗ. Применение двухэлементных интерферометров для определения фрагментов траекторий полета ИСЗ апробировано на инструменте НИРФИ метрового диапазона при измерениях элементов орбит навигационных ИСЗ типа “Цикада”. Для решения обратной задачи разработан способ определения географических координат и ориентации объектов-потребителей сигналов КНС с помощью бортового приемного комплекса, состоящего из двух интерферометров; проработан вопрос совмещения радиоинтерферометрической аппаратуры со штатными навигационными средствами для экономии времени и ресурсов при разработке соответствующей аппаратуры потребителей [24–31].

В настоящей работе приводятся основные результаты, полученные как в процессе эксплуатации радиоинтерферометров, так и при решении вопросов по применению данных инструментов в прикладных целях. Структура работы следующая. В

разделе 2 описаны разработки по оперативной калибровке базы и фазовой калибровке радиointерферометров, в разделе 3 описан метод суммирования эффективных площадей разнесенных антенн*. В разделе 4 обсуждаются возможности исследования ионосферы с помощью малобазовых интерферометров. В разделах 5 и 6 приводятся результаты разработок по применению радиointерферометров в космической навигации. В Заключении кратко сформулированы направления развития малобазовой радиointерферометрии.

2. КАЛИБРОВКА РАДИОИНТЕРФЕРОМЕТРОВ

2.1. Способ оперативного определения параметров базы

Определение параметров радиоастрономического инструмента — калибровка — является обязательной процедурой, обеспечивающей требуемую точность проводимых на нем исследований. Калибровка радиointерферометров со связанными элементами, в том числе систем апертурного синтеза, проводится, главным образом, по радиоизлучению внеземных источников с точечной структурой и достаточно большой интенсивностью, поскольку только таким образом реализуется высокая точность фазовых измерений и, соответственно, получаемых результатов.

Методики калибровки в процессе эксплуатации систем апертурного синтеза хорошо разработаны, составлены каталоги радиосточников-калибраторов. Процесс калибровки осуществляется путем наблюдений ряда радиосточников с разными склонениями δ и часовыми углами t . По измеренным значениям разности фаз сигналов, принятых антеннами интерферометра, находятся неизвестные параметры инструмента. Процедура калибровки занимает периоды времени от нескольких часов до нескольких суток. Разработаны алгоритмы определения как параметров инструмента (проекций базы, перекосов осей антенн,

* В разделах 2 и 3 подробно изложены работы, активное участие в которых принимал В. С. Беагон.

инструментальной разности фаз и т.д.), так и координат источников или долготы места (см., например, [32]).

Однако применяемые методы, которые в дальнейшем будем называть стандартными, малоэффективны или вообще неприемлемы в тех случаях, когда:

— инструменты имеют малую чувствительность и, следовательно, можно уверенно наблюдать только небольшое число радиоисточников-калибраторов;

— антенны интерферометра неполноповоротные;

— используется перевозимая антенна для получения различных наборов баз и требуется определение параметров базы и координат места установки без точной геодезической привязки;

— координаты источников известны не достаточно точно и поэтому требуется одновременное определение и проекций базы, и часового угла (подчеркнем, что метод симметрирования моментов измерения фазы относительно кульминации источника, разработанный для подобных случаев, не применим, если база интерферометра ориентирована в направлении восток-запад) [32].

При вводе в действие радиоинтерферометра дециметрового диапазона разрабатывались методы калибровки по одному-двум источникам и была апробирована методика уточнения долготы центра базы [2, 13, 14]. В продолжение этих работ был предложен метод определения поправки часового угла источника и одной из проекций баз интерферометра при записи сигнала точечного радиоисточника в небольшом временном интервале вблизи его кульминации $t \cong 0$, либо при $t \cong \pm\pi/2$. Принципиальной особенностью этого способа является то, что искомые параметры могут быть определены в единичном замере за короткие промежутки времени. Исходными данными для получения результата являются измеренные разности фаз, что предполагает использование двухканальной приемной аппаратуры; рассмотрен также вариант применения предлагаемого метода и для интерферометра с одноканальным приемником.

Согласно стандартной процедуре приема, используемой в системах апертурного синтеза, для радиоинтерферометра с двухканальным приемником при использовании метода “остановки фазы” сигнал накапливается в следующем виде:

$$\begin{aligned}
 C' &= \frac{1}{n} \sum_1^n (C_{\text{ИОМ}} C_{\text{ВЫЧ}} + S_{\text{ИОМ}} S_{\text{ВЫЧ}}) \sim \\
 &\sim \frac{1}{\Delta T} \int_{t_1}^{t_2} \cos(\varphi_{\text{ИОМ}} - \varphi_{\text{ВЫЧ}}) dt, \\
 S' &= \frac{1}{n} \sum_1^n (S_{\text{ИОМ}} C_{\text{ВЫЧ}} - C_{\text{ИОМ}} S_{\text{ВЫЧ}}) \sim \\
 &\sim \frac{1}{\Delta T} \int_{t_1}^{t_2} \sin(\varphi_{\text{ИОМ}} - \varphi_{\text{ВЫЧ}}) dt, \quad (1) \\
 \varphi &= \text{arctg} \left(\frac{S'}{C'} \right) = \varphi_{\text{ИОМ}} - \varphi_{\text{ВЫЧ}},
 \end{aligned}$$

$$\varphi_{\text{ИОМ}} = \varphi_0 + k_0 \cdot (L \sin \delta + M \cos \delta \cos t + N \cos \delta \sin t), \quad (2)$$

здесь $C_{\text{ИОМ}}$ и $S_{\text{ИОМ}}$ — измеренные значения выходных сигналов COS- и SIN-каналов приемника, $C_{\text{ВЫЧ}}$ и $S_{\text{ВЫЧ}}$ — вычисленные по заданным параметрам значения выходных сигналов, n — число замеров коррелятора, $\varphi_{\text{ИОМ}}$, $\varphi_{\text{ВЫЧ}}$ — измеренные и вычисленные значения разностей фаз, φ_0 — инструментальная разность фаз, ΔT — временной интервал накопления сигнала, L , M , N — проекции базы в системе координат, где ось L направлена на Полюс мира, ось M — на юг, ось N — на восток, $k_0 = 2\pi/\lambda$, λ — рабочая длина волны. Поправки к проекциям базы зададим как $\Delta N = N - N_{\text{расч}}$, N — искомое значение проекции базы, $N_{\text{расч}}$ — задаваемое при вычислении разности фаз.

В небольших пределах изменения часового угла можно принять $t = t_{\text{ср}} + \Delta t_{\text{н}} + t'$, $\sin t' \approx t'$, $\cos t' \approx 1$, пренебречь членами второго порядка малости относительно $\Delta t_{\text{н}}$, ΔM , ΔN и

проводить интегрирование по t' от $-\Delta T/2$ до $+\Delta T/2$, $t_{\text{ср}}$ — середина временного интервала. После интегрирования соответствующих аналитических выражений (1) получаем значение результирующего сигнала в виде:

$$C' = \cos \varphi_c \frac{\sin x}{x}, \quad S' = \sin \varphi_c \frac{\sin x}{x},$$

$$x = 0,5 k_0 \Delta T \cos \delta [(\Delta N - M_{\text{расч}} \Delta t_{\text{н}}) \cos t_{\text{ср}} - (\Delta M + N_{\text{расч}} \Delta t_{\text{н}}) \sin t_{\text{ср}}],$$

$$\varphi_c = \varphi_0 + k_0 [\Delta L \sin \delta + (\Delta N - M_{\text{расч}} \Delta t_{\text{н}}) \cos \delta \sin t_{\text{ср}} + (\Delta M + N_{\text{расч}} \Delta t_{\text{н}}) \cos \delta \cos t_{\text{ср}}]. \quad (3)$$

Здесь $\Delta t_{\text{н}}$ — ошибка t , которая равна ошибке в задании долготы центра базы при точно известных прямом восхождении источника и времени проведения замера. При отслеживании источника в течение определенного интервала времени ΔT амплитуда конечного сигнала будет равна $A = \sqrt{C'^2 + S'^2} = \sin x/x$, а фаза $\varphi = \varphi_c$. Из соотношения (3) видно, что при $t_{\text{ср}} = 0$ и $\Delta t_{\text{н}} = 0$ фаза сигнала $\varphi_{\text{сн}}$ не будет зависеть от величины проекции базы $N_{\text{расч}}$, а при $t_{\text{ср}} = \pm\pi/2$ — от $M_{\text{расч}}$.

Таким образом, процедура измерений для определения, например, проекции базы N и поправки часового угла источника $\Delta t_{\text{н}}$ будет следующей.

- 1) Проводится запись сигнала $C_{\text{изм}}$ и $S_{\text{изм}}$ в течение нескольких минут симметрично относительно момента кульминации источника.
- 2) Определяется вид функции $\varphi_c(N_{\text{расч}})$: при $\Delta t_{\text{н}} = 0$ это будет постоянная величина; если $\Delta t_{\text{н}} \neq 0$, то получится зависимость $\varphi_c(N_{\text{расч}})$, близкая к линейной при изменении $N_{\text{расч}}$ в небольших пределах (порядка λ). Рассчитав разность фаз для двух различных значений $N_{\text{расч}}$ по соотношению (3), имеем:

$$\Delta t_{\text{и}} = \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{k_0 \cdot \cos \delta \cdot (N_2 - N_1)}, \quad (4)$$

где $\varphi_2 - \varphi_1$, $N_2 - N_1$ — разность значений фазы, полученных для двух значений $N_{\text{расч}}$, и разность этих $N_{\text{расч}}$ (в (4) индекс “расч” для упрощения записи опущен).

- 3) Если поправка к часовому углу $\Delta t_{\text{и}}$ определена, то возможно определение N по максимуму амплитуды A , когда ошибка определения базы $\Delta N = 0$.

Измерения вблизи кульминации источников при $t \approx 0$ позволяют получить наибольшую точность искомых параметров для интерферометров с ориентацией базы, близкой к направлению восток — запад, при $t \approx \pi/2$ — для базы север — юг.

Для апробации метода была проведена серия наблюдений тринадцати радиоисточников различной интенсивности в момент их кульминации при длительности записи 3–4 минуты. Получено среднее значение поправки часового угла $0,03 \pm 0,15$ с. Измеренная величина проекции базы восток — запад получилась равной $416, 846 \pm 0,032$ м, её значение, измеренное по стандартной методике калибровки $416, 886 \pm 0,013$ м для эквивалентного числа измерений.

То есть, экспериментально достигнута погрешность определения поправки часового угла $\sim 0,01$ периода интерференционной картины и относительная погрешность определения максимальной проекции базы нашего инструмента $\sim 10^{-5}$.

Особенностью предложенного метода является то, что искомые параметры могут быть получены в единичном замере; погрешность результата уменьшается последовательным увеличением числа наблюдений.

Показана возможность применения варианта данного метода калибровки для радиointерферометров с одноканальным приемником при наблюдении мощных радиоисточников, когда на выходе приемника обеспечивается отношение сигнал/шум > 3 (подробное описание метода дано в работе [14]).

2.2. Способы фазовой калибровки малобазовых интерферометров

Назначение системы фазовой калибровки радиоинтерферометрического инструмента — подача синфазных калибровочных сигналов на входы приемных трактов как можно ближе к облучателям антенн, в идеальном случае — это внешний сигнал на антенны, проходящий далее через все активные и пассивные элементы приемного тракта. Наиболее часто применяемый прием при создании схемы калибровки — передача калибровочных сигналов по дополнительным линиям связи в прямом и обратном направлениях для исключения их электрической длины. Примером системы фазовой калибровки в чистом виде может служить схема Моримото [33], примененная в радиогелиографе в Кулгуре и в модифицированном виде использованная в радиоинтерферометре НИРФИ [1]. В варианте схемы [1] сигнал калибровочного генератора, расположенного в центральном пункте, передается к антеннам по дополнительным линиям связи, причем для передачи его через оба приемных тракта одновременно используется кабельная линия между антеннами. Схема достаточно проста и обеспечивает точность фазовой калибровки $2\text{--}3^\circ$, однако требует две калибровочные линии между антеннами, кроме трактов промежуточной частоты (ПЧ) и гетеродина, и для многоэлементных комплексов становится громоздкой и дорогостоящей, усложняет и затягивает процесс фазовой калибровки. Обеспечение быстрой фазовой калибровки становится весьма актуальной задачей при создании многоэлементных интерферометров на базе крупных антенн (например, 64- или 70-метровая антенна в сочетании с несколькими антеннами диаметром 2,5–10 м) или для бортовых навигационных радиоинтерферометрических комплексов.

Ниже подробно рассматриваются варианты схемы [1] для использования в радиоинтерферометрах с базами порядка 1 км в рабочем диапазоне 1–6 ГГц при применении внутренних и внешних источников калибровочного сигнала [7].

В первом случае с целью экономии кабельных трактов и для существенного уменьшения мощности задающих генераторов генератор калибровочного сигнала в центральном пункте заменен на отдельные генераторы (шума или монохроматические) на каждой из антенн (рис. 1), а сигналы в приемные тракты вводятся через систему сверхвысокочастотных (СВЧ) переключателей. Для нахождения разности фаз двух антенных высокочастотных (ВЧ) трактов производятся два измерения, при этом калибровочный сигнал проходит по калибровочному кабелю то в одном, то в другом направлении:

$$\Phi_1 = \varphi_1 - (\psi_0 + \varphi_2), \quad \Phi_2 = (\psi_0 + \varphi_1) - \varphi_2, \quad (5)$$

а искомая разность фаз равна

$$\varphi_1 - \varphi_2 = (\Phi_1 + \Phi_2)/2, \quad (6)$$

где φ_1, φ_2 — электрические длины ВЧ трактов каждой из антенн с неопределенностью $2\pi n$, ψ_0 — электрическая длина калибровочного кабеля также с неопределенностью $2\pi n$; неопределенность искомой разности $(\varphi_1 - \varphi_2)$ составляет в этом случае πn .

Анализ схемы рис. 1 приводит к следующим рекомендациям по исполнению отдельных элементов. Гибридные соединения “М” в двухантенном варианте должны делить сигнал задающего генератора в пропорции, определяемой затуханием в калибровочном кабеле; в многоэлементной системе эта пропорция определяется затуханием наиболее короткой трассы, при работе с другими антеннами необходимо вводить соответствующее дополнительное ослабление. Амплитуды сигналов, поступающих на входы приемников, для сохранения динамического диапазона не должны отличаться более чем на 3 дБ. Переключатели П2 пропускают сигнал либо без потерь, либо подключают к “своему” приемному тракту генератор с аттенюатором в одном плече, требуемая фазовая стабильность за цикл измерений $\sim 0^\circ, 5$. Оценки показывают, что при калибровочном кабеле

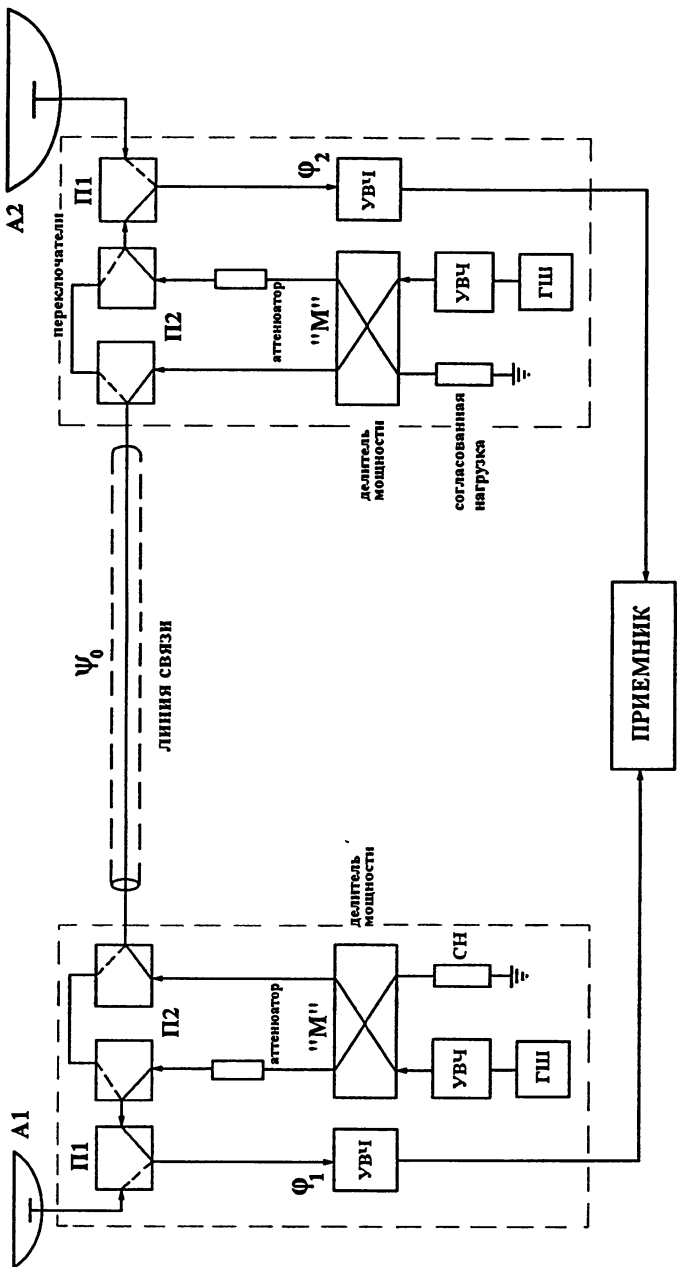


Рис. 1

марки РК50-17-51С длиной ~ 500 м затухание на частоте 6 ГГц составит ~ 70 дБ, поэтому развязка пары переключателей П2 должна быть больше 70 дБ, а развязка одного — ~ 40 дБ. Потери в переключателях допускаются в пределах 2 дБ. Переключатель П1 (“антенна–калибровка”) стоит в приемном тракте и должен иметь минимальные потери и развязку ~ 20 дБ.

Для многоэлементного комплекса схема рис. 1 может быть модернизирована таким образом, что генераторы сигналов калибровки остаются только на наиболее разнесенных антеннах, остальные антенны “включаются” в разрывы общего тракта; в этом случае требуется общее затухание калибровочной трассы не более 80–100 дБ, что на рабочих частотах ~ 6 ГГц нереально. Можно предложить следующие варианты технических решений, основанных на схеме калибровки рис. 1:

1) при большом затухании в кабельной линии связи использовать коммутируемые промежуточные УВЧ в разрывах линий,

2) калибровку многоэлементных комплексов производить по данной схеме попарно; число измерений фазы будет равно $2m$ (по m соотношений вида (5), где m — число двухэлементных интерферометров), вычисляться будут разности фаз вида (6), из которых можно получить и все остальные величины, например,

$$\varphi_1 - \varphi_m = (\Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 + \Phi_4 + \dots + \Phi_m)/2. \quad (7)$$

Очевидно, что при этом возрастает погрешность измерений разностей фаз вида (7). Процедура калибровки становится достаточно длительной при последовательном измерении разностей фаз каждой пары. Тем не менее, такая схема не требует сложных технических решений.

При малых размерах антенн, их небольшой высоте над поверхностью земли и расположении в линию по двум или нескольким направлениям можно осуществлять калибровку интерферометров по естественным и искусственным источникам излучения, отказавшись от калибровочных кабельных трасс.

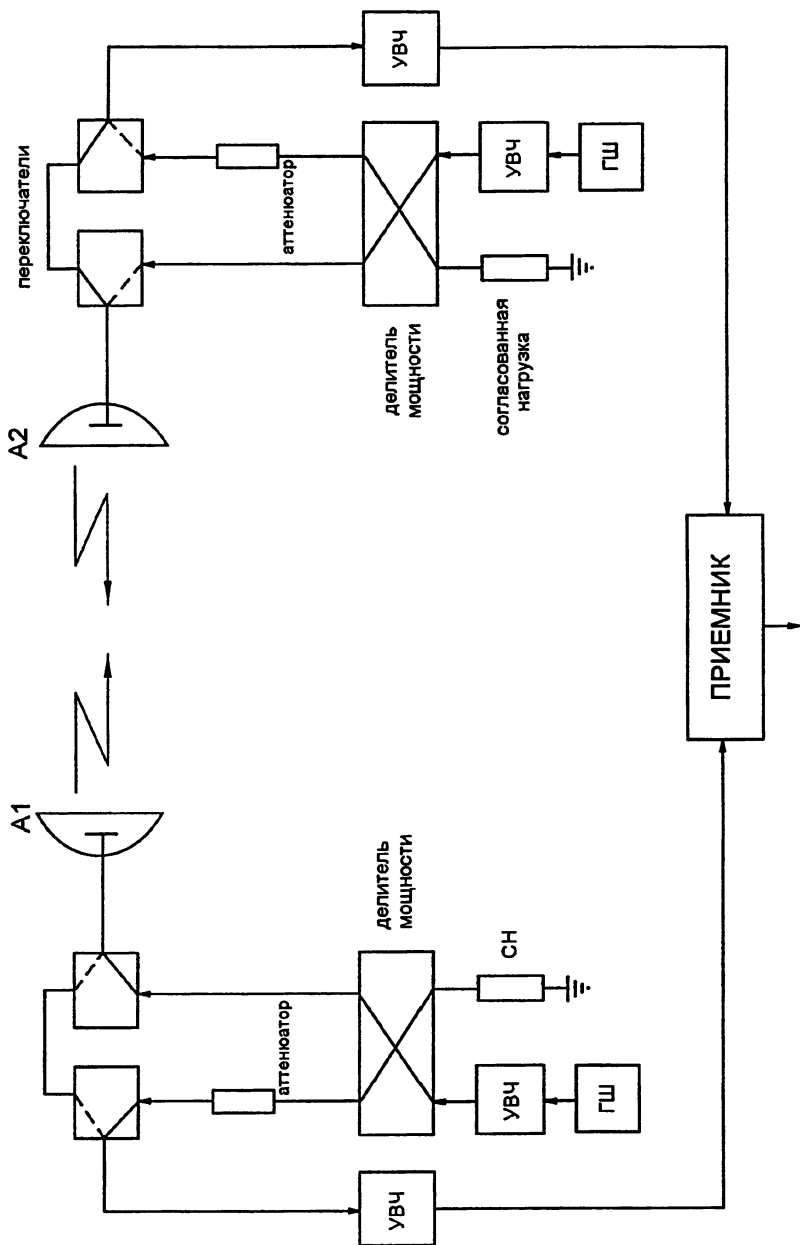


Рис. 2

При условии достижения нулевых и отрицательных углов места для всех антенн интерферометрического комплекса можно отказаться от калибровочного кабеля, излучая сигнал непосредственно из антенны в антенну (рис. 2), сохранив в основном описанную схему калибровки. Потери сигнала на излучение при базах ~ 1 км, диаметре антенн 2,5 м, коэффициенте использования поверхности КИП $\sim 0,5$ будут составлять примерно 20 дБ, т.е. существенно меньше, чем затухание в кабеле на частоте 6 ГГц.

В радиоастрономических инструментах с антеннами, имеющими диаметры зеркал десятки метров, для фазовой калибровки используются взеземные радиоисточники, однако интенсивность их излучения так мала, что применение их для интерферометров с небольшими антеннами практически невозможно. В этом случае можно проводить калибровку по наземным излучателям таким, как генераторы СВЧ и шумовых сигналов, искусственные эталоны из радиопоглощающих материалов ("черные тела") или естественные источники шумового сигнала (массивы леса, склоны гор и т.д.), которые широко применяются для амплитудной калибровки антенн различного назначения. При сохранении рассмотренной методики калибровки с обработкой по соотношениям (5) необходимо установить по два внешних излучателя на каждой линии антенн (или вдоль каждой базы) на определенном расстоянии от крайних антенн, отклонение положения излучателя от линии базы должно быть в пределах единиц градусов и определяться только углами закрытия антеннами друг друга. В случае применения чернотельных эталонов расположение на линии базы обусловлено также их диаграммой излучения. Кроме того, расположение излучателя на линии базы дает минимальную фазовую ошибку, вызванную нестабильностью его положения во время измерений, например, качанием от ветра. Для сведения к минимуму фазовых ошибок из-за приема сигналов, переотраженных от местных предметов, желательно применять шумовые излучатели,

поскольку при широких полосах приема помехи подавляются за счет раскорреляции при разных длинах трасс. С этой точки зрения нежелательно использование монохроматических источников излучения. Если в течение сеанса наблюдений условия распространения радиоволн в приземном слое постоянны, то возможна калибровка по одному излучателю.

При максимальных базах ~ 1 км чернотельные эталоны должны располагаться на расстояниях 100–500 м от крайних антенн и иметь размеры 5–10 м, что технически достаточно просто осуществимо. Подобные излучатели не требуют технического обслуживания, не имеют электронных устройств и сетей питания, однако полезный коррелированный сигнал от эталона невелик и может потребовать длительного накопления. Шумовые генераторы потребуют включения только на время калибровки для исключения помехового сигнала во время рабочего сеанса, и следовательно, постоянства характеристик излучаемого сигнала во время калибровочных измерений. Тем не менее, очевидно, что для частот 3–6 ГГц применение внешних излучателей может существенно облегчить проведение фазовой калибровки многопозиционных радиоинтерферометрических комплексов с невысокой чувствительностью.

3. СУММИРОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ ПЛОЩАДЕЙ РАЗНЕСЕННЫХ АНТЕНН

Если не говорить о системах апертурного синтеза, то суммирование сигналов разнесенных антенн до настоящего времени применялось, главным образом, при приеме узкополосных сигналов специальной формы от космических аппаратов (КА), находящихся на далеких от земли орбитах (см., например, [34]), для увеличения дальности приема. Ниже мы рассмотрим именно эту проблему.

В процессе выполнения совместных работ с предприятиями, владеющими крупными антенными комплексами в Уссурийске и

в Евпатории, была проведена разработка блок-схемы и процедуры суммирования сигналов разнесенных антенн для получения антенны большей эффективной площади [23].

Суммирование сигналов двух или нескольких разнесенных антенн заключается, главным образом, в осуществлении передачи сигналов с малыми потерями и точной их фазировки. В то же время, проблема определения положения КА состоит в точном измерении задержки (или разности фаз) сигналов от двух антенн, то есть эти две задачи сводятся к различным способам обработки выходного сигнала фазоизмерительного инструмента, каковым и является интерферометр со связанными элементами (ИСЭ). Разработаны также схемы суммирования сигналов приемных пунктов РСДБ [34].

Общим для двух возможных схем сложения сигналов (ИСЭ и РСДБ) можно считать то, что суммирование производится на наименьшей промежуточной частоте в реальном времени; составляющие суммарного сигнала не хранятся из-за слишком большого потока информации; выделение символьной информации производится на каждой из антенн или группы антенн в отдельности — эта информация записывается, хранится и используется для контроля сбойных или помеховых ситуаций, причем вся процедура проводится в штатном режиме работы одиночных пунктов приема информации с КА.

Сложение сигналов по высокой частоте предопределяет то обстоятельство, что оценки выигрыша необходимо делать для коррелированных напряжений полезных сигналов, пропорциональных по амплитуде диаметру приемных антенн, и некоррелированных шумов двух идентичных аппаратурных каналов (считаем для упрощения шумы трактов равными). Тогда полезный сигнал можно представить в виде суммы напряжений $(E_1 + E_2) = 2E$ при одинаковых диаметрах антенн, а шумы как $\sqrt{(\sigma_1^2 + \sigma_2^2)} = \sigma\sqrt{2}$, где σ^2 — дисперсия шума. Таким образом, на выходе сумматора отношение сигнал/шум (ОСШ) будет превышать ОСШ одной антенны в \sqrt{N} раз, где N — число антенн,

которые считаем идентичными. При последующем квадратичном детектировании мощность суммарного сигнала будет в N раз больше одиночного, то есть происходит сложение эффективных площадей антенн. Однако, поскольку обработка сигнала после сумматора в данной работе не рассматривается, последующие оценки проведены для напряжений сигналов.

Очевидно, что сложение сигналов от двух антенн, существенно различных по диаметру, приведет к ухудшению результирующего ОСШ, если не ввести процедуру обработки с весовыми множителями. Например, “прямое” сложение сигналов 70- и 32-метровых зеркал при одинаковых шумах приведет к улучшению ОСШ не более чем на 3%. Введение весового коэффициента, равного $32/70 = 0,46$, приведет к увеличению напряжения полезного сигнала на 21%, а шумов — на 10%, то есть улучшению ОСШ на 11%. Сложение сигналов 70- и 25-метровой антенн без веса только ухудшает результат. Суммирование сигналов наиболее эффективно для близких по диаметру антенн, причем в этом случае влияние весовых коэффициентов незначительно.

В качестве примера приведем некоторые сведения из работы [34], позволяющие оценить выигрыш от суммирования сигналов различных антенных комплексов.

Для VLA улучшение отношения G/T (усиление к шумовой температуре) для 27 антенн относительно одной составляет 14 дБ, то есть по напряжению примерно в 5 раз, что близко к величине $\sqrt{27} \cong 5,2$. Указывается также, что VLA эквивалентна 3 антеннам диаметром 64 метра — выигрыш в 4,7 дБ (1,72 раза) относительно параметра G/T одной 64-метровой антенны. Однако даются две другие величины: добавление 64-метровой антенны в Парксе к Австралийскому комплексу (64 м + 34 м) приводит к “улучшению на 50%” и добавление VLA к Голдстоунскому комплексу (70 м + 34 м) “удваивает его способности”.

Радиоинтерферометр НИРФИ, построенный по блок-схеме [1] (см. п.1.1), может являться основой комплекса для суммирования сигналов антенн при незначительной доработке, так

как подобный инструмент с высокой точностью измеряет разность фаз принимаемых антеннами сигналов. Для достижения цели суммирования необходимы следующие операции:

- 1) выравнивание задержек сигналов по измеренной разности фаз (задержке),
- 2) выделение сигналов для суммирования,
- 3) суммирование в отдельном субблоке, запись или передача на последующие схемы сумматора при числе антенн более двух.

В соответствии с этими требованиями в приемную аппаратуру необходимо внести дополнительные элементы, в совокупности с коррелятором называемые комбинатором. В простейшем виде это будут цепи разветвления сигналов в каналах амплифазометра: после линий задержки сигналы подаются одновременно на коррелятор и на сумматор с введением автоматического управления задержкой в зависимости от разности фаз, измеряемой коррелятором (рис. 3).

Практически здесь возникают вопросы, требующие проработки для реального режима передачи сигналов КА.

Во-первых, определение задержки (разности фаз) сигнала в стандартном режиме работы интерферометра потребует определенного времени—тем большего, чем с худшей точностью известны координаты КА. Значит, до передачи основной информации потребуются передача калибровочного сигнала для уточнения положения КА. В дальнейшем управление фазировкой сигналов должно производиться автоматически от ЭВМ по мере приема информации одновременно по каналам коррелятора и сумматора. Обработка этой процедуры может занять значительное время, что вызывает необходимость теоретического моделирования этого процесса и экспериментальной проверки с отладкой программного обеспечения.

Во-вторых, поскольку сложение сигналов проводится на промежуточной частоте 2...2,5 МГц (длина волны $\sim 120\text{--}150\text{ м}$), грубую фазировку с помощью линий задержки провести нельзя

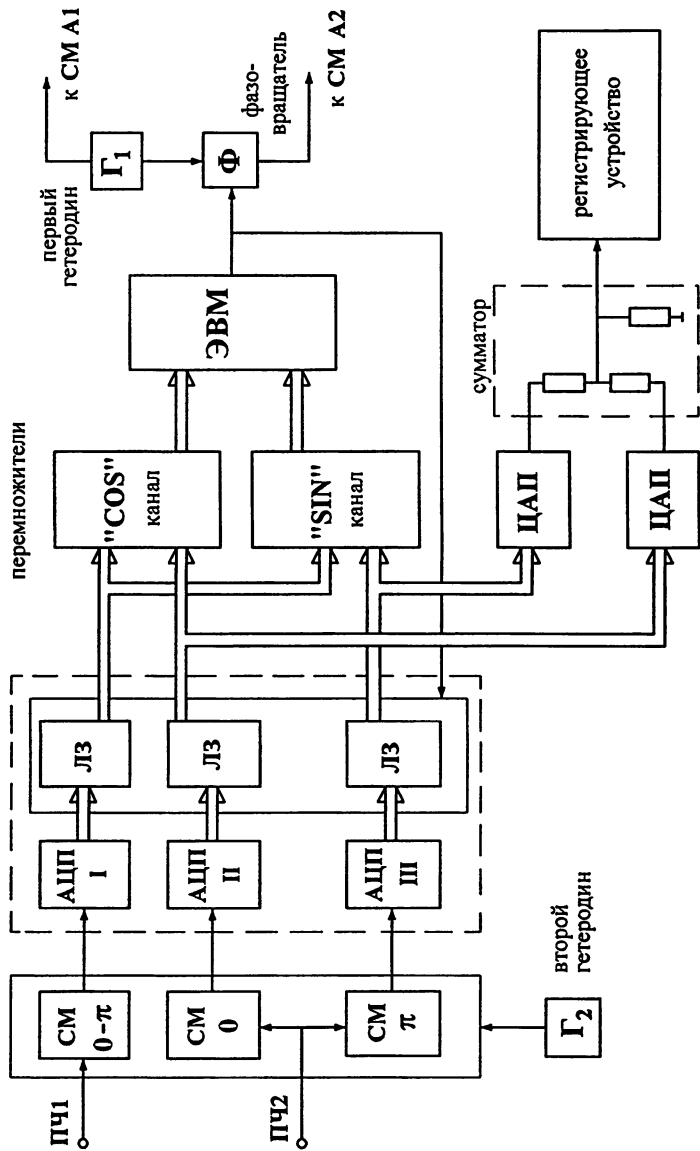


Рис. 3

без потери сигнала из-за раскорреляции. Поэтому в тракт гетеродина или ВЧ одной из антенн необходимо ввести фазовращатель ($\geq 360^\circ$ по ВЧ), а точную фазировку проводить с помощью линий задержки (не более 2–3 дискретов). При узкой полосе полезного сигнала (~ 300 кГц) спад функции корреляции незначителен, а дискрет задержки (~ 4 м, 12 нс в аппаратуре НИРФИ) мал по сравнению с длиной волны ПЧ, то есть спад амплитуды суммарного сигнала из-за дискрета фазирования будет составлять доли процента (0,3%).

Параметры сигналов на цифроаналоговом преобразователе (ЦАП) перед сумматором следующие: число уровней квантования — 64 (6-разрядный ЦАП), дискрет — 100 нс (10 МГц), то есть поток информации 60 Мбит/сек. Провести запись такого сигнала не представляется возможным, что и определяет необходимость дальнейшего сложения по высокой частоте в реальном времени или демодуляции в телеметрическом приемнике и записи символьной информации. Можно изменить параметры квантования, однако это может привести к недопустимым потерям. Вопрос записи и хранения ВЧ сигнала до сложения должен рассматриваться отдельно при известных технических характеристиках записывающих устройств.

Экспериментальные исследования возможности сложения сигналов разнесенных антенн проводились на радиоинтерферометре дециметрового диапазона. Основной целью эксперимента являлось:

- 1) определение величины улучшения отношения сигнал/шум (ОСШ) при сложении сигналов двух антенн;
- 2) проверка возможности применения простейшего сумматора при минимальных изменениях существующего комплекса аппаратуры;
- 3) оценка эффективности различных вариантов фазирования сигналов;
- 4) исследование характеристик аппаратуры в данном режиме работы.

Характер проводимых экспериментов определялся возможностями нашего инструмента. От использования естественных источников радиоизлучения пришлось отказаться по двум причинам: 1) невозможность оценки величины результирующего сигнала из-за слишком малого принимаемого сигнала практически от всех внеземных радиоисточников и 2) из-за шумового характера излучения, резко отличающегося от рабочих сигналов КА.

Для достижения поставленных целей была реализована блок-схема с использованием монохроматического сигнала генератора, распределяемого из центрального пункта через антенные коммутаторы в ВЧ тракты каждой из антенн по кабельным трассам системы фазовой калибровки. Изменение частоты задающего генератора позволяло изменять частоту выходного сигнала интерферометра (по второй промежуточной частоте) от 0 до 2,5 МГц. Перед коррелятором сигнал разветвлялся и подавался одновременно на коррелятор для измерения фазы и на выходные ЦАП с последующим суммированием на схеме сложения, приведенной на рис. 3. Из-за высокой частоты результирующего сигнала регистрация его была возможна только на осциллографе из-за отсутствия быстродействующих ЭВМ с большой памятью.

Схема сложения сигналов предельно проста и дает суммарный сигнал в виде $A_{\Sigma} = (A_1 + A_2)$, что позволяло на экране осциллографа достаточно точно определять изменения A_{Σ} , особенно при равенстве A_1 и A_2 . Были проведены следующие измерения:

1) суммирование сигналов двух антенн на частотах $f_{ПЧ} = 0,76$ и 2,5 МГц при отношении $c/\lambda = 1 \dots 4$; фазирование сигналов осуществлялось с помощью линий задержки по второй ПЧ и с помощью фазовращателей в трактах гетеродина и задающего генератора;

2) измерение зависимости фазы сигнала от частоты в зависимости от величины вводимой задержки, а также ряд других

характеристик для получения данных о ряде параметров инструмента.

Исследования процедуры суммирования на двух достаточно разнесенных частотах позволили выявить недостаток первоначально предложенной схемы фазирования, в которой использовались только линии задержки. При большой длине волны точное выполнение фазировки сигналов потребовало больших величин задержки при неравных по длине ВЧ трактах, а это при определенной полосе сигнала приводит к его раскорреляции и, следовательно, потерям. Выравнивание электрических длин трактов, а вернее фазы принимаемых сигналов, удобнее проводить с помощью фазовращателей, вставленных в тракты гетеродина или ВЧ одной из антенн. Точность установки фазы фазовращателями может быть невысока, поскольку остаточную фазу можно скомпенсировать линией задержки (желательно не более нескольких дискретов; в нашей аппаратуре дискрет линии задержки равен ~ 4 м).

Исследования зависимости характеристик результирующего сигнала от ряда параметров исходных (калибровочных) сигналов и элементов аппаратуры подтвердили теоретические предпосылки метода суммирования сигналов на интерферометрическом комплексе, а фактически являлись калибровкой аппаратуры при данном режиме работы системы. Для примера на рис. 4 приведены графики зависимости фазы сигнала от частоты при разных величинах задержки, по которым видно, во-первых, что требуется фазировка двух сигналов с точностью до дискрета линии задержки (12,5 нс) для достижения равномерности амплитудно-частотной характеристики во всей полосе сигнала; во-вторых, эти измерения показали достаточно большие изменения амплитуды сигнала с изменением частоты, что требует анализа исполнения соответствующих узлов аппаратуры.

Кратко полученные результаты можно сформулировать следующим образом.

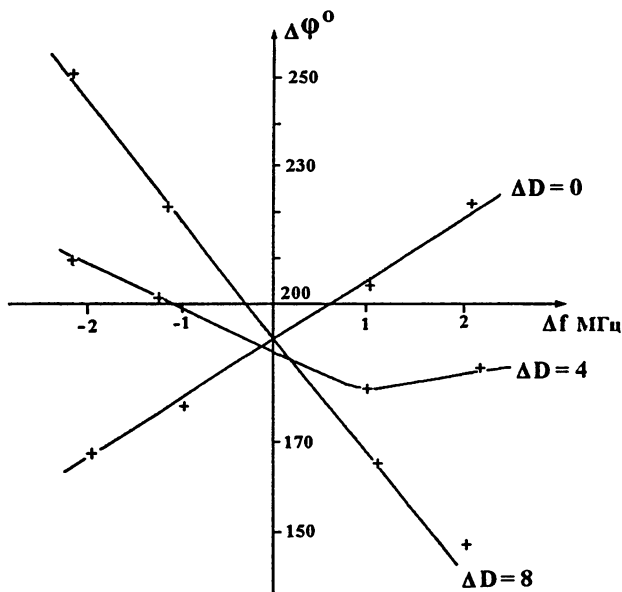


Рис. 4.

1) Комплекс аппаратуры интерферометра дециметрового диапазона с незначительными переделками (без конечных каскадов записи) может использоваться для суммирования сигналов двух антенн и служить основой для создания соответствующей аппаратуры на пунктах дальней космической связи (ДКС).

2) Амплитуда суммарного сигнала при сложении сигналов от двух антенн равна сумме амплитуд слагаемых, суммарная амплитуда шумов в $\sqrt{2}$ раз меньше амплитуды шумового слагаемого. ОСШ увеличивается в $\sqrt{2}$ раз при равенстве исходных сигналов. При сложении неравнозначных сигналов без весовых коэффициентов суммарный сигнал хуже наилучшего.

3) Результаты проведенных экспериментов позволяют разработать схемы сложения сигналов трех 14-метровых антенн апертурного синтеза РАО "Старая Пустынь" для получения объединенной антенны с эффективной площадью, эквивалентной антенне с диаметром зеркала порядка 25 м.

4. ИССЛЕДОВАНИЕ ИОНОСФЕРЫ РАДИОИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИМИ ИНСТРУМЕНТАМИ

Ионосферные неоднородности оказывают существенное влияние на работу радиоинтерферометра, вызывая флуктуации фазы и амплитуды выходного сигнала при неидентичных условиях распространения радиоволн на лучах зрения каждой из антенн. Влияние их таково, что в системах апертурного синтеза наблюдения источников на высотах ниже 20° обычно не проводятся, а для повышения точности калибровки инструмента радиоисточники наблюдаются длительное время с последующим усреднением данных, дисперсия результата может служить индикатором состояния ионосферы. Если же исследовать вариации измеряемой разности фаз сигналов за короткие промежутки времени, то можно сделать более точные выводы о характере происходящих в ионосфере процессов [20–22].

Методика измерений для контроля активности ионосферы достаточно проста: интенсивный “точечный” радиоисточник, координаты которого точно известны, наблюдается непрерывно в течение длительного времени. При обработке данных исключаются регулярные изменения разности фаз, вызванные инструментальными факторами. Отклонения остаточной фазы от величины, вычисляемой для калибровочного источника, несут информацию об ионосферных возмущениях.

Для выяснения возможностей исследования неоднородности ионосферы описанным способом была проведена обработка ряда калибровочных замеров радиоисточника Лебедь-А на интерферометре с базой 417 м на частоте 540 МГц [19]. Наблюдения были проведены в период нахождения источника в зоне часовых углов на закате Солнца, когда ионосфера наиболее нестабильна. На рис. 5 приведена зависимость разности фаз от времени наблюдения. Видно, что имеют место волнообразные возмущения фазы с периодом около 50 минут, характерным

для среднemasштабных перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ), которые являются следствием прохождения среднemasштабных внутренних гравитационных волн через ионосферу.

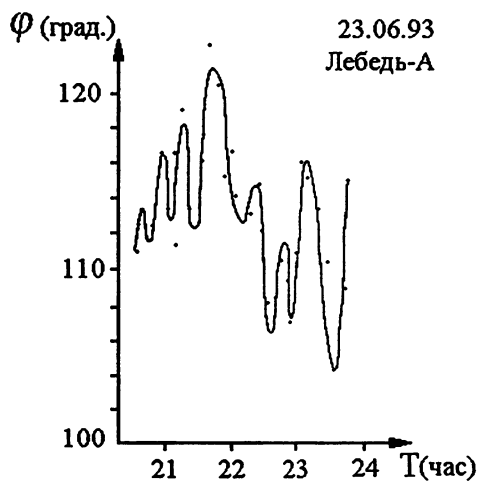


Рис. 5.

Поскольку разность фаз, связанная с неоднородностями в ионосфере, пропорциональна горизонтальному градиенту электронного содержания, то естественно считать, что волнообразные возмущения фазы сигнала от времени с периодами около одного часа вызваны прохождениями ПИВ, по видимому, преимущественно в направлении восток — запад.

Работа на частоте 540 МГц велась в режиме апертурного синтеза с усреднением принимаемых данных за 30–60 секунд (обычным для систем апертурного синтеза), что могло привести к потере информации о быстрых вариациях электронного содержания ионосферы. С этой точки зрения наблюдения на интерферометре метрового диапазона (база 60 м, частота 152 МГц) представляли особый интерес, поскольку при калибровочных измерениях велась запись в память ЭВМ РС АТ полного массива информации с выборкой 1 с и последующей обработкой данных. При обработке по алгоритму нахождения вариаций фазы, вызванных ионосферой, в большинстве записей наблюдались быстропериодические (20–30 с) изменения разности фаз с амплитудой до 15° . На рис. 6–9 приведены примеры записей изменения разности фаз сигнала в зависимости от вре-

мени после исключения постоянной составляющей, обусловленной движением источника по небесной сфере. Здесь же даны исходные интерферограммы записей (амплитуды SIN- и COS-каналов), из которых видно, что в этой серии наблюдался эффект мерцаний сигнала, в ряде случаев напоминающий сигнал от быстро движущегося искусственного источника (ИСЗ, самолет). Однако длительность помехи, огибающая которой не повторяет форму диаграммы направленности антенн, и характер фазовой зависимости указывают на её естественную природу. Для правильной интерпретации полученных данных были обработаны несколько записей сигналов от внеземных источников при спокойной ионосфере, когда шумы определяются, в основном, аппаратурой (например “спокойные” участки записей на рис. 6–8), и при очень сильных мерцаниях принимаемого сигнала (рис. 9). Из представленных данных следует, что нестационарные процессы в ионосфере, приводящие к сильным мерцаниям амплитуды сигнала, так же сильно влияют на фазовые характеристики (изменения разности фаз за несколько секунд могут достигать 0,2–0,5 рад.), однако строгой периодичности этих изменений практически нет. В то же время в “чистых” по амплитуде записях наблюдаются плавные изменения фазы сигнала, аналогичные изменениям для слабозамущенной ионосферы, что объясняется более высокой чувствительностью инструмента к фазовым характеристикам сигнала. Быстропериодических изменений фазы сигнала в этой серии наблюдений при спокойной ионосфере не обнаружено.

Предварительный анализ обнаруженного эффекта с большой степенью вероятности указывает на ионосферное происхождение периодических вариаций фазы сигнала, однако точная идентификация с каким-либо процессом в ионосфере требует более тщательного исследования.

Приведенные результаты позволяют сделать вывод о возможности применения малобазовых интерферометров для мониторинга волновой активности ионосферы.

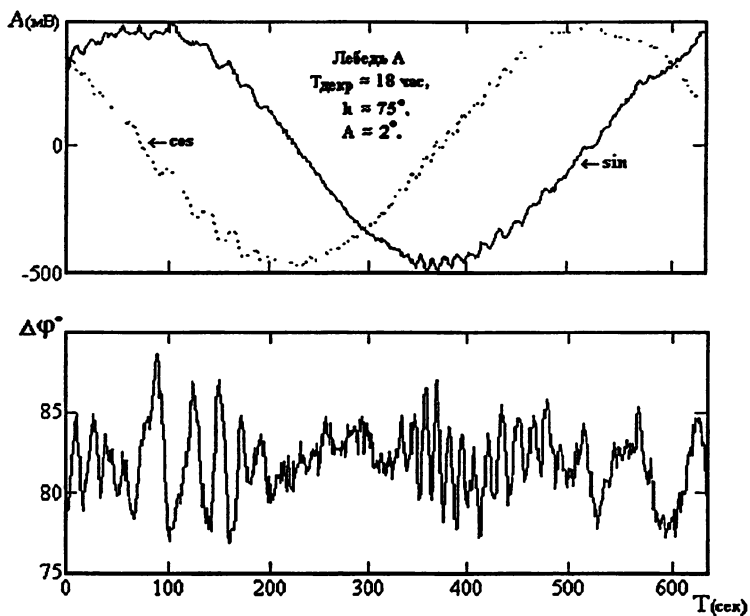


Рис. 6.

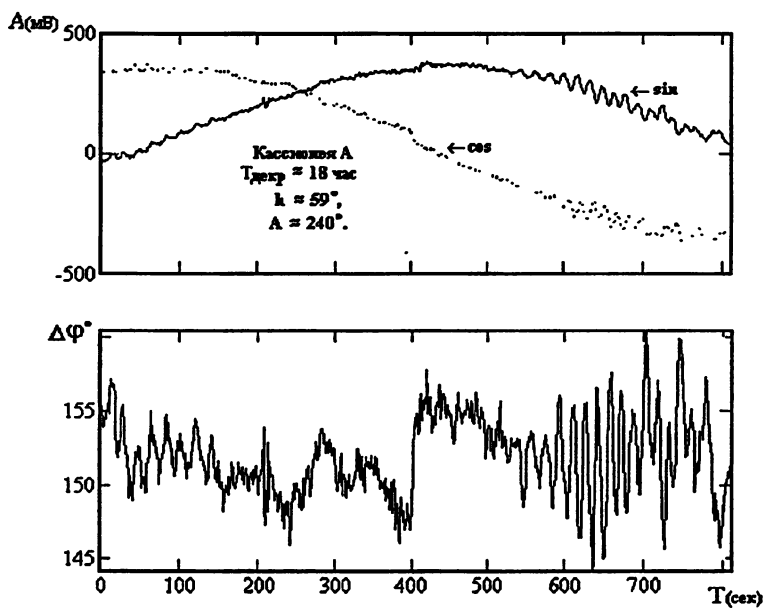


Рис. 7.

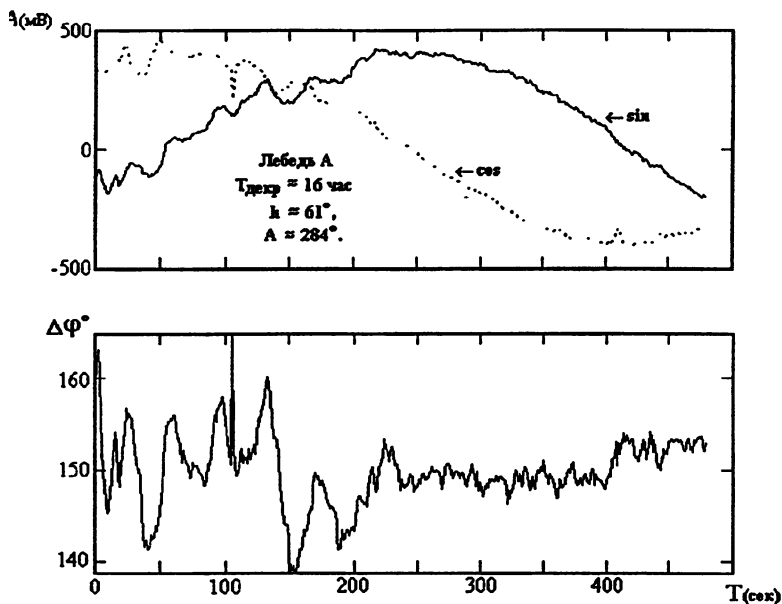


Рис. 8.

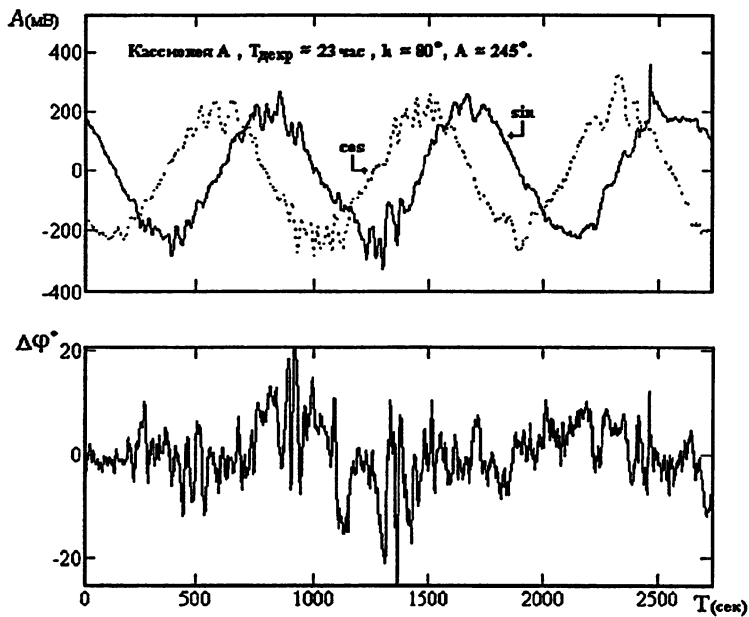


Рис. 9.

5. ПРИМЕНЕНИЕ РАДИОИНТЕРФЕРОМЕТРОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ КНС

Проблема повышения эффективности функционирования КНС “ГЛОНАСС” в последние годы стала крайне актуальной как по причине уменьшения действующей группировки НИСЗ, так и из-за резкого сокращения на территории нашей страны числа наземных контрольно-измерительных пунктов, выполняющих траекторные, координатные и навигационные измерения ИСЗ. Уменьшение числа пунктов, определяющих состояние всей группировки НИСЗ и её частей над различными районами Земли, может привести к существенным ошибкам в измерении или расчете положения НИСЗ, а следовательно, к ошибкам в навигационных параметрах потребителей. Поэтому, кроме совершенствования имеющихся штатных средств навигации, актуальна задача разработки новых методов и средств для решения возникшей проблемы.

Одним из вариантов повышения эффективности КНС типа “ГЛОНАСС” (повышение точности навигационных измерений и устойчивости функционирования) считается введение дифференциального режима работы, что влечет за собой создание локальных и региональных сетей контрольно-корректирующих станций (ККС), точно привязанных на местности и передающих потребителям корректирующую информацию (КИ) для введения поправок к навигационным параметрам (НП). Основная идея метода — сопоставление значений НП, измеренных эталонированной ККС, с априорными их значениями и вычисление систематических погрешностей, обусловленных эфемеридными погрешностями координат НИСЗ, уходами его шкалы времени и влиянием среды распространения сигналов в ионосфере и тропосфере. Очевидно, что разделить вклад каждого из этих факторов в общую погрешность достаточно сложно. Для передачи КИ должен использоваться свой канал связи, в аппаратуре потребителей (АП) требуется установка дополни-

тельных субблоков приема и обработки КИ. С удалением АП от ККС точность метода ухудшается.

Исходя из опыта эксплуатации малобазовых интерферометров НИРФИ, были рассмотрены вопросы использования подобных инструментов в структуре наземных средств КНС [24–29]. Предложен следующий вариант построения ККС в сети дифференциальных навигационных подсистем.

1) Установка на каждой ККС 2–3 фазостабильных корреляционных интерферометров с базами от десятков метров до единиц километров с кабельными или оптоволоконными линиями связи; антенные системы могут быть двух типов — на основе антенн КНС “ГЛОНАСС” (GPS) или с крупными (более 10 м) зеркалами для калибровки по космическим радиоисточникам и привязки положения НИСЗ к небесной системе координат. Интерферометрический комплекс позволит измерять положение любого видимого НИСЗ с эфемеридной точностью практически в реальном времени и, следовательно, осуществлять непрерывный контроль целостности данного навигационного созвездия НИСЗ. При непрерывном слежении за одним из НИСЗ даже одним интерферометром возможно:

а) определение скорости углового перемещения и при измерении псевдодалности штатными средствами расчет всех составляющих скорости движения объекта,

б) определение ошибок в измеряемой разности фаз сигналов, вносимых ионосферными и тропосферными неоднородностями, и, следовательно, осуществление непрерывного контроля состояния трассы распространения радиоволн в данном направлении.

2) Объединение ККС в единую интерферометрическую сеть с помощью оптоволоконных или радиорелейных (по типу системы апертурного синтеза “MERLIN”) линий связи.

С целью определения эффективности проведения траекторных измерений радиointерферометрическими системами на РАО “Старая Пустынь” проведена серия измерений фрагментов траекторий полета ИСЗ. Прием сигналов от КА проводился

одновременно с наблюдениями внеземных естественных радиоисточников, что позволило реализовать дифференциальный метод координатных измерений. В описанной ниже серии наблюдений параметры орбит спутников не были известны. Задача состояла в том, чтобы определить по интерферометрическим записям фрагменты траекторий полета ИСЗ. При нахождении координат источника излучения с постоянными (α, δ) методика измерений и обработки данных хорошо разработана [2, 32]. Если же наблюдается источник с переменными экваториальными координатами (КА, ИСЗ), то для нахождения неизвестных координат источника, вообще говоря, необходимо одновременно провести интерферометрические измерения инструментами с различными базами. При использовании одного интерферометра возникает необходимость сделать некоторые дополнительные предположения о характере движения объекта. Продолжительность регистрации сигнала КА определяется временем его пребывания в пределах диаграммы направленности (ДН) антенн — элементов интерферометра. В наших измерениях длительность сеансов наблюдения КА была невелика (как правило $\sim 1-3$ мин). Поэтому было принято, что на протяжении таких интервалов времени координаты КА изменяются с постоянной скоростью и могут быть представлены в виде [25]:

$$\begin{aligned}\alpha(T) &= \alpha_0 + \omega_\alpha(T - T_0), \\ \delta(T) &= \delta_0 + \omega_\delta(T - T_0),\end{aligned}$$

где α — прямое восхождение объекта, T — декретное время, T_0 — момент начала регистрации сигнала КА, α_0, δ_0 — координаты в момент T_0 , $\omega_\alpha, \omega_\delta$ — скорости изменения координат. Фрагмент траектории КА определяется четырьмя параметрами: $\delta_0, \omega_\delta, t_0, \omega_t$. Система уравнений для решения координатной задачи имеет вид:

$$\varphi(T_k) - \varphi_k = 0, \quad k = 0, 1, 2, \dots, n, \quad n \geq 3. \quad (8)$$

Здесь n — число отсчетов, произведенных за время регистрации сигнала КА, φ_k — фаза, измеренная в момент T_k , $\varphi(T_k)$ —

расчетная фаза, определяемая выражением (2). Входящий в (2) параметр φ_0 определяется калибровкой и вычитается из измеренной фазы. После соответствующей обработки массивов данных (коррекция на аппаратурные и методические искажения) и решения системы уравнений (8) были получены искомые фрагменты траекторий полета ИСЗ. На рис. 10 приведен пример про-

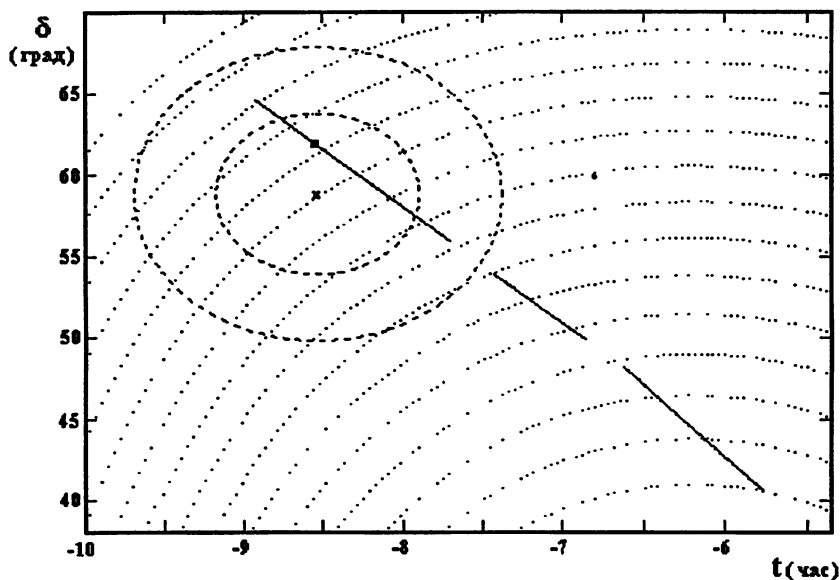


Рис. 10.

лета ИСЗ через главный и два боковых лепестка диаграммы направленности антенн. Видно, что при пролете ИСЗ через несколько интерференционных лепестков, т. е. в направлениях, близких к ориентации базы, решение задачи о параметрах траектории достаточно надежно и однозначно. Однако большинство ИСЗ, излучающих на рабочей частоте интерферометра, имеют околополярные орбиты и движутся перпендикулярно базе нашего инструмента. Большая часть проведенных записей сигналов ИСЗ имеет один - два интерференционных максимума,

а зависимость фазы от времени не линейна. В этом случае решение усложняется, возникает несколько вариантов траекторий, удовлетворяющих измеренной фазовой зависимости. Для ИСЗ, орбиты которых в грубом приближении известны и требуется только уточнение параметров траектории, описанные выше неоднозначности не играют большой роли. Однако ясно, что для траекторных измерений необходимо использовать интерферометры с достаточно большой проекцией базы в направлении север-юг или два инструмента с ортогональными базами, то есть проекции базы на направления север-юг и восток-запад должны быть приблизительно одинаковы, чтобы можно было измерять все шесть элементов орбиты ИСЗ. Тем не менее, исходя из полученных результатов, можно заключить, что первые экспериментальные работы по использованию радиоастрономических интерферометров в решении траекторных задач подтвердили теоретические разработки о возможности применения и высокой эффективности радиоинтерферометров со связанными элементами в космической навигации.

6. ПРИМЕНЕНИЕ БОРТОВЫХ РАДИОИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ НАВИГАЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ОБЪЕКТОВ-ПОТРЕБИТЕЛЕЙ СИГНАЛОВ КНС

При решении навигационной задачи объектами-потребителями сигналов глобальных космических навигационных систем (КНС) актуально не только определение географических координат объектов, но и их ориентации. Наибольшей точности подобных определений можно достичь, главным образом, за счет прецизионных фазовых измерений, которые проводятся на радиоинтерферометрах с двухканальным корреляционным приемником и системой фазовой калибровки. Принцип определения ориентации объектов по сигналам навигационных искусственных спутников Земли (НИСЗ) с помощью фазоизмерительных

систем, факторы, влияющие на точность измерений, используемая аппаратура обсуждались в обзоре [35]. В целях сокращения времени получения данных о положении объекта, упрощения аппаратурного комплекса и методик измерения оптимальным решением является применение комплекта аппаратуры, измеряющего набор параметров сигналов НИСЗ, по которым восстанавливается информация как о положении, так и об ориентации объекта-потребителя [30, 31].

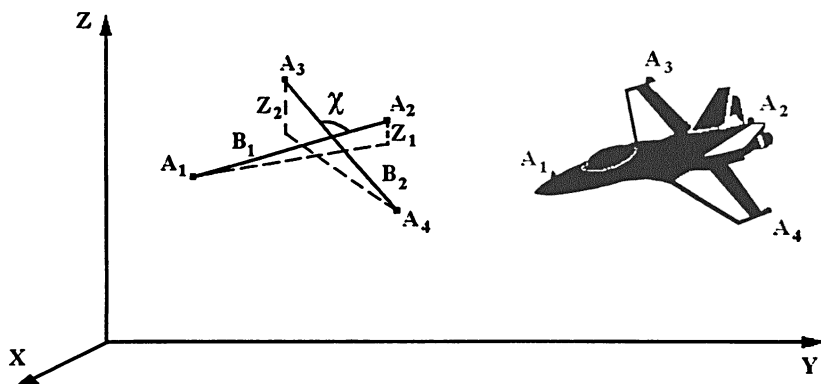


Рис. 11.

Рассмотрим алгоритм решения общей навигационной задачи в предположении о наличии на объекте-потребителе двух радиоинтерферометров (рис. 11) и одновременной их работе по трем НИСЗ. В данном случае параметры для нахождения ориентации базы B , величину которой считаем точно известной, находятся из решения системы трех уравнений вида (2). Величины L, M, N определяются экспериментально при одновременных или квазисовременных (в зависимости от динамичности объекта) измерениях разности фаз сигналов, принимаемых разнесенными антеннами от трех или более навигационных спутников, координаты которых (δ, t) точно известны. В системе координат с осью x , направленной на юг, осью y — на восток и

осью z — в зенит, имеем

$$\begin{aligned} X &= -L \cos \varphi_g + M \sin \varphi_g, & L &= -X \cos \varphi_g + Z \sin \varphi_g, \\ Y &= N, \\ Z &= L \sin \varphi_g + M \cos \varphi_g, & M &= X \sin \varphi_g + Z \cos \varphi_g, \end{aligned} \quad (9)$$

где φ_g — широта места нахождения объекта-потребителя. Ориентацию объекта, определяемую направлением базовой линии B , зададим двумя углами:

$$\theta = \arcsin \frac{Z}{B}, \quad A = \operatorname{arctg} \frac{X}{Y}. \quad (10)$$

Погрешности определения этих углов зависят от погрешностей измерения разностей фаз φ , времени, координат НИСЗ и объекта. Из соотношения (2) видно, что при двух группах неизвестных параметров: (L, M, N) — база и (φ_g, λ_g) — широта и долгота места ($t(T, \alpha, \lambda_g)$, T — декретное время, α — прямое восхождение источника излучения), исходное уравнение является нелинейным и аналитическое решение задачи возможно лишь в отдельных частных случаях. Начальным этапом в анализе проблемы является рассмотрение системы уравнений, получаемых из (2) путем несложных преобразований,

$$\begin{aligned} \frac{\varphi_{ij}}{\cos \delta_j} &= L \operatorname{tg} \delta_j + \sqrt{M^2 + N^2} \sin(t_{ij} + \psi), \quad j = 1 \div 3, \\ \psi &= \operatorname{arctg} \frac{M}{N}, \quad t = s - \alpha, \quad t_j = t_1 - \Delta\alpha_{j1}, \end{aligned} \quad (11)$$

где s — местное звездное время в момент времени T_i , t_1 — часовой угол НИСЗ, например, с минимальным прямым восхождением из всей группы, $\Delta\alpha_{j1}$ — разность прямых восхождений j -го и первого спутников. Требуется одновременное измерение разности фаз φ_{ij} по трем спутникам с координатами (α_j, δ_j) (здесь и далее все искомые проекции базы нормированы к длине волны $L \rightarrow 2\pi L/\lambda$). Комбинируя уравнения системы (11)

таким образом, чтобы исключить член $\sqrt{M^2 + N^2}$ с двумя неизвестными, получим соотношения для расчета проекции базы L и величины $(t_1 + \psi)$:

$$L = (\varphi_1 \cos \delta_2 \cos \delta_3 \sin \Delta \alpha_{32} - \varphi_2 \cos \delta_1 \cos \delta_3 \sin \Delta \alpha_{31} + \varphi_3 \cos \delta_1 \cos \delta_2 \sin \Delta \alpha_{21}) \times (\sin \delta_1 \cos \delta_2 \cos \delta_3 \sin \Delta \alpha_{32} - \sin \delta_2 \cos \delta_1 \cos \delta_3 \sin \Delta \alpha_{31} + \sin \delta_3 \cos \delta_1 \cos \delta_2 \sin \Delta \alpha_{21})^{-1}, \quad (12)$$

$$\text{ctg}(t_1 + \psi) = \text{ctg} \Delta \alpha_{21} - \frac{(\varphi_2 - L \sin \delta_2) \cos \delta_1}{(\varphi_1 - L \sin \delta_1) \cos \delta_2 \sin \Delta \alpha_{21}}, \quad (13)$$

где $\Delta \alpha_{mn} = \alpha_m - \alpha_n$ — точно известные величины. Дальнейшее решение задачи возможно только при использовании второго интерферометра с базой B_2 , с ориентацией как можно более отличающейся от ориентации базы B_1 первого интерферометра, лучше всего ортогональной ей, поскольку при этом наиболее точно определяется проекция L_2 , если $L_1 \sim 0$. Рассчитав проекции L_1 и L_2 по соотношению (12), точно зная угол поворота χ одной базы относительно другой и считая, что интерферометры параллельны поверхности земли в данной точке (т.е. $Z_1 = Z_2 = 0$, что существенно упрощает решение), получим из соотношений (9) и (10) для азимута A базы B_1 и для широты места соотношения

$$\text{ctg} A = \left(\frac{L_2 B_1}{L_1 B_2} - \cos \chi \right) \frac{1}{\sin \chi},$$

$$\cos \varphi_g = - \frac{\sqrt{L_1^2 B_2^2 + L_2^2 B_1^2 - 2 L_1 L_2 B_1 B_2 \cos \chi}}{B_1 B_2 \sin \chi}.$$

Далее из соотношения (13) находится часовой угол t_1 , определяющий долготу λ_g , где величина ψ определяется как

$$\psi = \text{arctg} \left(\frac{-L \sin \varphi_g}{\sqrt{B^2 \cos^2 \varphi_g - L^2}} \right).$$

Работоспособность данного алгоритма оценена методом математического моделирования. В отдельной работе будет приведен расчет погрешности измерений и проведен анализ оптимального расположения НИСЗ в зоне видимости объекта для получения минимальных погрешностей измерений. Решение задачи при Z не равных нулю является предметом дальнейшего рассмотрения и не содержит принципиальных сложностей, кроме более громоздкого математического аппарата, так как в любом случае для решения задачи потребуется задать жесткую и точно известную геометрию антенного комплекса и проводить измерения при определенных условиях на положение объекта относительно земной поверхности. Сочетание данного метода определения НП со штатной навигационной системой позволит провести оперативные измерения курса и углов наклона (крена и дифферента) морских и воздушных судов.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для дальнейшего развития малобазовой радиоинтерферометрии требуется создание аппаратных комплексов на рабочие диапазоны частот КНС "ГЛОНАСС" и GPS, разработка проектов совмещенной радиоастрономической и штатной навигационной аппаратуры для получения максимальной эффективности приемных комплексов. Целесообразна разработка интерферометрических систем для определения курса и углов наклона (крена и дифферента) морских и воздушных судов, а также систем определения ориентации низкоорбитальных ИСЗ.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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. № 11. С. 1420–1427.
2. Дугин Н. А. Разработка и исследование двухэлементной системы апертурного синтеза. Дис. . . к.ф.-м.н. — Горький: НИРФИ, 1983.
3. Дугин Н. А., Добрушский Л. А., Кузнецова И. П., Вьюгин В. Д. Трехантенная система апертурного синтеза метрового диапазона // Тезисы докладов XXVI Радиоастрономической конференции. — С.-Пб., 1995. С. 365.
4. 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 НИРФИ № 143. — Горький: НИРФИ, 1980. 55 с.
5. Romanychев А. А., Dugin N. A. Formation of phase-coherent signals at interferometric antennas sites using very high intermediate frequency // IEEE AP-S/URSI Simp. Canada, Montreal, 1997. № 46.08.
6. Романычев А. А., Дугин Н. А. Схема формирования синфазных сигналов в радиоинтерферометре со сверхвысокой промежуточной частотой // Радиотехника и электроника. 2003 (в печати).
7. Беагон В. С., Дугин Н. А. О фазовой калибровке малобазовых радиоинтерферометров // Сб. тр. ОКБ МЭИ “Радиотехнические тетради”. 1995.

8. Беагон В. С., Дугин Н. А., Лупанов В. Р. Система дистанционного управления антеннами радиоинтерферометра НИРФИ // Первая республиканская конференция "Математические методы анализа и оптимизации зеркальных антенн различного назначения". Тезисы докладов. 6–10 марта 1989, Свердловск, Инст. матем. и механики УрО АН СССР, с. 170.
9. Дугин Н. А., Семенова Л. Р. Определение параметров базы интерферометра по радиоизлучению внеземных источников (программы обработки) // Препринт НИРФИ №166. — Горький: НИРФИ, 1983. 65 с.
10. Дугин Н. А., Семенова Л. Р., Турчин В. И. Обработка информации при суперсинтезе линейной апертуры // Препринт НИРФИ №174. — Горький: НИРФИ, 1983. 47 с.
11. Кузнецова Н. А., Дугин Н. А. Каталог радиосточников для антенных и интерферометрических измерений. — Горький: НИРФИ, 1988.
12. Дугин Н. А., Ковальчук О. М., Семенова Л. Р. База данных для радиоастрономических методов антенных и интерферометрических измерений // XXVI Радиоастрономическая конференция. Тезисы докладов. — С.-Пб., 1995. С. 255–256.
13. 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. №46.07.
14. Дугин Н. А., Нечаева М. Б. О возможности быстрого определения параметров радиоинтерферометра // Изв. вузов. Радиофизика. 2002. Т. 45. №3. С. 199–206.

15. Беагон В. С., Дугин Н. А., Романычев А. А., Шнырова Е. Ю. Применение фазостабильных радиointерферометров для определения расстояний и местоположения на поверхности земли. Тезисы докл. Всесоюзной науч.-техн. конф. "Современные проблемы фазоизмерительной техники и её применения", 18–22 сент. 1989, Красноярск, КПИ, с.184.
16. Алексеев В. А., Дугин Н. А., Липатов Б. Н., Мельников В. Ф., Снегирев С. Д., Тихомиров Ю. В. // Изв. вузов. Радиофизика. 1997. Т. 40. №9. С.1063–1072.
17. Алексеев В. А., Липатов Б. Н., Мельников В. Ф., Сизов А. С., Снегирев С. Д., Тихомиров Ю. В., Абызов А. А., Дементьев А. Ф., Дмитренко Д. А., Дугин Н. А., Карабельников И. А., Князев Н. А., Крюков А. Е., Шигин Е. В. Интерферометрические наблюдения солнечных вспышек с высоким временным разрешением // Препринт НИРФИ №407. — Нижний Новгород: НИРФИ, 1995. 29 с.
18. Дугин Н. А., Разин В. А., Смышляева Г. Г., Теплых А. И. Поляризационно-интерферометрические исследования радиоизлучения избранных областей Галактики // XXVII Радиоастрономическая конференция. Тезисы докладов. — С.-Пб., 1997. С.124.
19. Добрушский Л. А., Дугин Н. А., Разин В. А., Смышляева Г. Г. К вопросу об учете влияния ионосферы на навигационные измерения. Тр. конференции "Современные проблемы и методы астрометрии и геодинамики". — С.-Пб., 1996. С. 282–288.
20. Добрушский Л. А., Дугин Н. А., Кузнецова И. П. О возможности контроля волновой активности ионосферы по вариациям фазы радиointерферометрического сигнала. Всероссийская конференция по физике солнечно-земных связей. Тезисы докладов. — Иркутск, 2001. С. 74–75.

21. Dobrushsky L. A., Dugin N. A., Kuznetsova I. P., Razin V. A., Smyshlyaeva G. G. Investigation of fast-varying of ionospheric TEC by phase-measuring methods // The III-rd Russian – Chinese Space Weather Conf. 18 – 22 Iule 2002, Irkutsk. P. 37–39.
22. Добрушский Л. А., Дугин Н. А., Кузнецова И. П., Разин В. А., Смышляева Г. Г. Исследования неоднородной ионосферы радиointерферометрами метрового и дециметрового диапазонов // Космонавтика и ракетостроение. — М.: ЦНИИМАШ, 2002. №4 (29). С. 108–115.
23. Беагон В. С., Дугин Н. А. Суммирование площадей разнесенных антенн с помощью техники фазостабильной радиointерферометрии // XXVI Радиоастрономическая конференция. Тезисы докладов. — С.-Пб., 1995. С. 331–332.
24. Дугин Н. А., Кузнецова И. П. Определение координат космических аппаратов и положения потребителей космических навигационных систем с помощью радиointерферометров со связанными элементами. Тр. конференции “Современные проблемы и методы астрометрии и геодинамики”. — С.-Пб., 1996. С. 277–281.
25. Дугин Н. А., Кузнецова И. П., Разин В. А., Смышляева Г. Г. Применение малобазовых радиоастрономических интерферометров для координатных и траекторных измерений. Часть 1 // Препринт НИРФИ №450. — Нижний Новгород: НИРФИ, 1999. 36 с; Часть 2 // Препринт НИРФИ №454. — Нижний Новгород: НИРФИ, 1999. 24 с.
26. Дугин Н. А., Кузнецова И. П., Разин В. А., Смышляева Г. Г., Старостин В. Н. Определение фрагментов траектории полета КА радиointерферометром со связанными элементами. Тр. конференции “Радиолокация, навигация, связь” RLNC-99. — Воронеж, 1999.

27. Дугин Н. А., Кузнецова И. П., Разин В. А., Смышляева Г. Г. О радиоастрономических методах повышения эффективности космических навигационных систем. Конференция “Астрометрия, геодинамика и небесная механика на пороге XXI века”. Тезисы докладов. — С.-Пб., 2000. С. 356–357.
28. Дугин Н. А., Разин В. А., Старостин В. Н., Грачев В. Г., Смышляева Г. Г., Прохоров В. А. О возможности обеспечения высокоточного однопроходного определения координат КА на основе использования радиointерферометрической технологии. Конференция “Астрометрия, геодинамика и небесная механика на пороге XXI века”. Тезисы докладов. — С.-Пб., 2000. С. 386–387.
29. Дугин Н. А., Разин В. А., Смышляева Г. Г. Об использовании технологии малобазовой радиointерферометрии для эфемеридной поддержки космических навигационных систем. Тезисы докл. Российской конф. памяти А. А. Пистолькорса “Радиотелескопы РТ-2002”, 9–11 октября 2002, Пущино, ПРАО. С. 42.
30. Дугин Н. А., Разин В. А., Смышляева Г. Г. Повышение точности определения ориентации и географических координат объектов по сигналам глобальных КНС с помощью бортовых радиointерферометров // Четвертая Российская научно-техническая конференция “Современное состояние, проблемы навигации и океанографии”. Сб. докладов. Т. 1. — С.-Пб.: 6-9 июня 2001, ГНИНГИ МО, С. 201-204.
31. Дугин Н. А., Разин В. А., Смышляева Г. Г. К вопросу об определении ориентации КА по сигналам космической навигационной системы с помощью бортового радиointерферометрического приемного комплекса // Восьмой все-

российский съезд по теоретической и прикладной механике. Аннотации докл. — Пермь, 2001. С. 239–240.

32. Томпсон Р., Моран Дж., Свенсон Дж. Интерферометрия и синтез в радиоастрономии. — М.: Мир, 1989.
33. Morimoto M. // *Electr. Letters*. 1965. V. 1. № 7. P. 192.
34. Brown D. W. et al. Interagency telemetry arraying for Voyager-Neptune encounter. TDA Progress Rep. 42-102, aug. 15, 1990. P. 91–113.
35. Абросимов В. Н., Алексеева В. И., Гребенко Ю. А., Лукин В. И., Мищенко И. Н., Новиков И. А. Использование системы NAVSTAR для определения угловой ориентации объектов // *Зарубежная радиоэлектроника*. 1989. № 1. С. 46–53.

СОДЕРЖАНИЕ

1. Введение	3
1.1. Радиointерферометр дециметрового диапазона	3
1.2. Радиointерферометры метрового диапазона	4
2. Калибровка радиointерферометров	7
2.1. Способ оперативного определения параметров базы	7
2.2. Способы фазовой калибровки малобазовых интерферометров	12
3. Суммирование эффективных площадей разнесенных антенн	18
4. Исследование ионосферы радиointерферометрическими инструментами	27
5. Применение радиointерферометров для повышения эффективности КНС	32
6. Применение бортовых радиointерферометрических комплексов для навигационных измерений объектов-потребителей сигналов КНС	36
7. Заключение	40
Литература	41

ДУГИН Николай Александрович
РАЗИН Владимир Андреевич

МАЛОБАЗОВЫЕ РАДИОИНТЕРФЕРОМЕТРЫ НИРФИ

Подписано в печать 14. 02. 03 г. Формат 60 × 84/16.
Бумага писчая. Объем 3,0 усл. п. л.
Тираж 100. Заказ 5528.

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