

Министерство высшего и среднего специального образования
РСФСР

Ордена Трудового Красного Знамени
Научно-исследовательский радиопизический институт (НИРФИ)

Преприят № 127

**ОБ ОПТИМАЛЬНОЙ СТРУКТУРЕ ДЛИННОБАЗОВОГО
РАДИОИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ
СОВМЕСТНОГО РЕШЕНИЯ АСТРОФИЗИЧЕСКИХ,
АСТРОМЕТРИЧЕСКИХ И ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ЗАДАЧ**

В.А. Алексеев

Горный - 1970 г.

А н н и с т а ц и я

Проводится анализ методов решения астрофизических, астрометрических и геодинамических задач с использованием средств длиннобазовой радиоинтерферометрии и на его основе делается заключение о структуре радиоинтерферометрического комплекса, наиболее адекватной совокупным требованиям решаемых задач при минимальном составе комплекса.

1. В начале 60-х годов нашего столетия в СССР был предложен способ построения радиоинтерферометров с применением систем независимого приема [1], позволяющий разносить пункты интерферометра на неограниченно большие расстояния в целях получения сверхвысокого углового разрешения. В наземных условиях с помощью такого радиоинтерферометра на волне 1 см возможно получение углового разрешения $\sim 10^{-9}$ рад., что почти на два порядка превышает разрешение лучших оптических инструментов.

Первоначально радиоинтерферометры со сверхдлинными базами (РСДБ) в силу специфики метода измерений предназначались только для решения частной радиоастрономической задачи — определения угловых размеров компактных космических радиоисточников и модельного оценивания их угловой структуры. Однако даже в этом качестве ценность получаемой информации о размерах таких "необычных" объектов, как квазары, пульсары, космические мазеры и др., не получаемой какими-либо другими средствами, вполне оправдывала затраты средств на создание РСДБ. Результаты последующих экспериментов полностью подтвердили это положение [2].

В конце 60-х — начале 70-х годов было определено, что средствами РСДБ можно также проводить точные из-

мерения координат космических источников и параметров базы интерферометра в небесной системе координат [3, 4], и на этой основе решать задачи астрометрии и геодинамики [5, 6, 7] с точностями, более чем на порядок выше, чем дают средства оптической астрономии, и с неоспоримыми преимуществами радиодиапазона: всепогодность измерений и возможность наблюдений наиболее удаленных объектов Вселенной. Проведенные к настоящему времени эксперименты [8, 9] подтвердили эффективность применения РСДБ в решении указанных задач.

Сейчас можно считать, что в целом становление метода длиннбазовой интерферометрии как инструмента экспериментальной радиоастрономии завершено; установлены также основы направлений астрометрии и геодинамики с использованием длиннбазовых радиоинтерферометров. Но до настоящего времени эксперименты с РСДБ носят весьма эпизодический характер, с вынужденной организацией РСДБ на базе тех существующих радиотелескопов, которые имеют достаточную чувствительность к слабому радиоизлучению удаленных космических источников малых размеров, позволяют разместить соответствующую аппаратуру и работать по программе одновременных наблюдений с нескольких пунктов. Естественно, что такие системы не могут лучшим образом решать всю совокупность возможных задач, что снижает их продуктивность. И в этом плане представляется весьма актуальным вопрос об оптимальной структуре длиннбазового радиоинтерферометрического комплекса для совместного решения астрофизических, астрометрических и геодинимических задач, оптимальность которой определяется условием наибольшей адекватности совокупным требованиям решаемых задач при минимальном составе комплекса.

2. Основной задачей наблюдательной радиоастрономии в астрофизических исследованиях, к решению которой должны привлекаться радиоинтерферометрические средства, является определение структуры космических объектов в широком интервале временных и пространственных частот.

В этом плане длиннобазовая ($(\frac{S}{\lambda}) > 10^6 \lambda$; S - длина базы интерферометра, λ - длина волны принимаемого излучения) радиоинтерферометрия отличается от классической малобазовой ($(\frac{S}{\lambda}) < 10^6 \lambda$) в методическом отношении невозможностью прямого измерения фазы комплексного спектра пространственных частот распределения радиояркости по наблюдаемому источнику, что делает неприменимыми традиционные методы получения радиосизображений наблюдаемых источников с использованием сфазированных интерферометров.

Отклик длиннобазового радиоинтерферометра при наблюдении протяженного источника имеет вид:

$$R(\theta, \psi, t) = \exp j \frac{2\pi S \sin \theta_0}{\lambda} \frac{\iint \gamma(\theta', \psi') \exp j \frac{2\pi S \sin \theta'}{\lambda} d\theta' d\psi'}{\iint \gamma(\theta', \psi') d\theta' d\psi'} \chi_1$$

$$\times R(\tau) \exp j \omega (\Delta \tau_w + \Delta \tau_{атм}) t,$$

где $\lambda = \frac{2\pi c}{\omega}$ - длина волны принимаемого излучения от источника протяженностью B с функцией распределения радиояркости $\gamma(\theta, \psi)$; θ_0 - положение начала координат по источнику, отсчитываемое от нормали к базовой линии интерферометра; $R(\tau)$ - огибающая функции кросскорреляции принятого в разнесенных пунктах излучения; $\Delta \tau_w, t$ - расхождение шкал времени в пунктах интерферометра; $\Delta \tau_{атм}$ - взаимное смещение принимаемых сигналов из-за разности набегов их пути в атмосфере Земли, $\tau_w = \frac{S \sin \theta}{c} + \Delta \tau_w, t + \Delta \tau_{атм}, t$.

Невозможность прямых фазовых измерений связана с неконтролируемыми фазовыми и временными возмущениями интерферируемых сигналов как по техническим причинам, так и по условиям распространения принимаемого радиоизлучения через космическую среду и атмосферу Земли, причем на масштабах более 100 км только флукту-

ирующий дифференциальный набег фазы сигналов, проходящих от источника до антенн интерферометра через атмосферу Земли оказывается более \dots во всем радиоастрономическом диапазоне длин волн (см., например, [5]).

Для получения радиоизображений космических радиоисточников с применением длиннбазовых радиоинтерферометров и интерферометров с любыми базами при использовании в них систем независимого приема предложены так называемые метод "опорного объекта" [10], ряд разновидностей [11, 12, 13] метода "замыкания фазы" [14] и метод апертурно-частотного синтеза [15, 16].

По методу опорного объекта фаза интерференционного отклика от исследуемого источника сравнивается с фазой отклика от точечного опорного источника, при этом разностная фаза имеет вид

$$\begin{aligned} \varphi &= \frac{4\pi S}{\rho \lambda} \cos\left(\frac{\theta_{00} + \theta_{0u}}{2}\right) \sin\left(\frac{\theta_{00} - \theta_{0u}}{2}\right) \frac{2\pi S_{эфф}}{\lambda} \Delta\theta \left(\frac{S_{эфф}}{\lambda}\right)_t + \Delta\varphi_{атм,t} = (2) \\ &= \varphi_t - \alpha \left(\frac{S_{эфф}}{\lambda}\right)_t + \Delta\varphi_{атм,t}, \end{aligned}$$

где $\theta_{00}(t)$, $\theta_{0u}(t)$ — координаты опорного и "центра" исследуемого источника, отсчитываемые от нормали к базовой линии интерферометра в плоскостях, проходящих через базу интерферометра и источник; $S_{эфф,t} = S \cos(\theta_{0u}(t))$ — эффективная длина базы в момент t ; $\Delta\varphi_{атм,t}$ — остаточный набег фазы интерферируемых сигналов на неоднородностях атмосферы.

В величине φ_ρ отсутствуют полностью аппаратные фазовые смещения интерферируемых сигналов и существенно уменьшены атмосферные набег фаз за счет фильтрации влияния неоднородностей, угловые размеры которых более углового расстояния между исследуемым и опорным источниками. Однако искомая фаза $\alpha \left(\frac{S_{эфф}}{\lambda}\right)_t$ спектральной компоненты пространственной частоты $\left(\frac{S_{эфф}}{\lambda}\right)_t$ от

функции распределения радиояркости по исследуемому источнику оказывается смещенной на величину Ψ_t , для вычисления которой необходимы очень точные данные астрометрических, геодезических и геодинамических определений (учитывая, что ошибка вычисления не должна превышать десятых долей радиана), и при современном уровне этот способ реализуем только при очень малых величинах ($\theta_{00} - \theta_{0u}$) - порядка единиц градусов.

В том случае, если интервал времени наблюдений опорного и исследуемого источников достаточно велик, определенная величина Ψ_t возможно путем моделирования функции Ψ_t , наилучшим образом совпадающей с функцией $\Psi_p(t)$ и имеющей в экваториальных координатах вид:

$$\Psi_t' = \frac{2\pi}{\lambda} \left\{ S_p' (\sin \delta_{00}' - \sin \delta_{0u}') + S_e' (\cos^2 \delta_{00}' + \cos^2 \delta_{0u}' - 2 \cos \delta_{00}' \cos \delta_{0u}' \cos(\alpha_{00}' - \alpha_{0u}'))^{1/2} \sin \Omega t + \alpha_6' + \arctg \left(\frac{\cos \delta_{0u}' + \sin(\alpha_{00}' - \alpha_{0u}')}{\cos \delta_{0u}' \cos(\alpha_{00}' - \alpha_{0u}') - \cos \delta_{00}'} \right) \right\} \Psi_e' \quad (3)$$

Здесь моделируемыми параметрами функций Ψ_t' являются: S_p и S_e - полярная и экваториальные проекции базы интерферометра, α и δ - прямые восхождения и склонения источников, Ω - угловая скорость вращения Земли и α_6 - прямое восхождение вектора базы. Этот способ аналогичен традиционному способу [17] определения начала координат источника при получении его радиоизображений с помощью сфазированного интерферометра. Очевидно, что точность приближения $\Psi_t'(t)$ и $\Psi_t(t)$ будет тем выше, чем больше интервал наблюдений $\Delta \Omega t$ исследуемого и опорного источников; при этом следует учитывать, что фаза $\Psi_p(t) - \Psi_t(t)$ будет соответствовать фазе $\alpha \left(\frac{S_{\text{эфф}}}{\lambda} \right) t$ с заданием начала координат по исследуемому источнику в некотором эффективном "центре" его радиояркости для области синтезированных пространственных частот внутри интервала наблюдений данным интерферометром. Естественно, что для различных облас-

тей пространственных частот положение эффективного центра яркости может меняться, в силу чего радиоизображения одного и того же источника, полученные на различных интерферометрах, могут оказаться несовместимыми.

В целом на применение метода опорного объекта имеется ограничение по минимальной рабочей длине волны, обусловленное влиянием мелкомасштабных неоднородностей атмосферы Земли. По нашим оценкам, если угловое расстояние между опорным и исследуемым объектом превышает $0,1$ рад., предельная волна для применения метода опорного объекта составляет величину $2-3$ см.

Метод "замыкания фаз" требует для своей реализации синхронных наблюдений минимум с трех пунктов; по алгоритму этого метода составляется по правилу замыкания сумма фаз интерференционных откликов различных двухэлементных интерферометров, образующихся в данном многоэлементном комплексе. Суммарная фаза для трехэлементного интерференционного комплекса имеет вид:

$$\varphi_{1-2-3} = \varphi_{1-2} \left(\frac{S_{1-2}}{\lambda} \right) + \varphi_{2-3} \left(\frac{S_{2-3}}{\lambda} \right) + \varphi_{3-1} \left(\frac{S_{3-1}}{\lambda} \right) =$$

$$d_{12} \left(\frac{S_{12}}{\lambda} \right) + d_{23} \left(\frac{S_{23}}{\lambda} \right) + d_{13} \left(\frac{S_{13}}{\lambda} \right), \quad (4)$$

где $\varphi_{i-k} \left(\frac{S_{i-k}}{\lambda} \right)$ - являются фазами интерференционных откликов, полученных интерферометрами с пунктами $i-k$; $d_{ik} \left(\frac{S_{ik}}{\lambda} \right)$ являются фазами спектральных компонент частот $\frac{S_{ik}}{\lambda}$ функции распределения радиояркости по наблюдаемому источнику. Заметим, что величина φ_{1-2-3} инвариантна к заданию начал координат на источнике.

Из известных разновидностей этого метода корректную постановку задачи получения радиоизображения наблюдаемого источника на основе данных об амплитудном спектре пространственных частот и величин φ_{i-j-k} и соответствующее решение дают только варианты синтеза линейной антенной решетки [11, 12], которые позволяют получать лишь одномерные изображения. При произвольном рас-

положении пунктов радиоинтерферометрического комплекса задача получения изображений по методу замыкания фазы в целом является некорректной. Ее решение требует либо привлечения априорных данных о структуре наблюдаемого источника, либо заполнения большой области пространственных частот, когда только на основе амплитудных данных о спектре уже возможно получение достаточно точной модели структуры источника. При этом известную трудность составляет проблема разрешения неоднозначности фазовых измерений [18].

Представляется, что весьма эффективным будет сочетание методов "опорного объекта" и "замыкания фазы": методом замыкания фазы возможно совмещение начал координат изображений, полученных методом опорного объекта на различных двухэлементных интерферометрах, а методом опорного объекта возможно получение модели структуры исследуемого объекта для последующего ее уточнения методом замыкания фазы. Существенно, что по методу замыкания фазы в задаче получения радиоизображений космических объектов практически полностью исключается влияние атмосферы Земли, что снимает ограничения на диапазон рабочих частот интерферометрического комплекса и позволяет проводить астрофизические исследования интерферометрическим методом в диапазоне миллиметровых и субмиллиметровых волн.

Метод апертурно-частотного синтеза [15] реализуем для N -элементного комплекса ($N \geq 3$) при многочастотном приеме в каждом пункте. При этом каждый из $\frac{1}{2} N(N-1)$ двухэлементных интерферометров этого комплекса позволяет в каждый момент времени наблюдений получить данные о спектре пространственных частот в области $\left(\frac{S_{lk, \text{эфф}}}{\lambda_{\text{max}}} \dots \frac{S_{lk, \text{эфф}}}{\lambda_{\text{min}}} \right)$, где $S_{lk, \text{эфф}}$ - эффективная длина базы интерферометра с пунктами l и k , $\lambda_{\text{max}} - \lambda_{\text{min}}$ - интервал рабочих длин волн для данного интерферометра. По этому методу для исключения аппаратных и части атмосферных фазовых сдвигов интерферируемых сигналов, а так же для приведения фаз спектральных

компонент, полученных в данный момент времени на данном интерферометре, но на разных длинах волн, к единому началу координат по исследуемому источнику используется соотношение

$$\varphi(\lambda_1) - n\varphi(\lambda_2) = d \left(\frac{S_{1k, \text{зфф}}}{\lambda_1} \right)_t - n d \left(\frac{S_{1k, \text{зфф}}}{\lambda_2} \right)_t, \quad (5)$$

где $n = \frac{\lambda_2}{\lambda_1}$; λ_1 и λ_2 — длины волн, на которых проводились интерферометрические наблюдения. Для приведения "мгновенных" спектров, полученных на различных двухэлементных интерферометрах, к единому началу координат по источнику, необходимо воспользоваться уравнением связи:

$$d \left(\frac{S_{12, \text{зфф}}}{\lambda_1} \right) = d \left(\frac{S_{34, \text{зфф}}}{\lambda_2} \right) \text{ при } \frac{S_{12, \text{зфф}}}{S_{34, \text{зфф}}} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}. \quad (6)$$

Для этого необходимо вести прием в соответствующем интервале длин волн, а вектора $\overline{S_{12, \text{зфф}}}$ и $\overline{S_{34, \text{зфф}}}$ должны быть коллинеарны, для выполнения чего следует использовать вращение Земли. Учитывая, что из-за вращения Земли путь проекции базы на плоскость источника (UV — плоскость) описывается эллипсом, метод апертурно-частотного синтеза позволяет привести к единому началу координат по источнику фазы интерференционных откликов для пространственных частот, образуемых пересечением прямой линии, проходящей через центр UV — плоскости с различными эллипсами для различных баз и длин волн. Это позволяет получить соответствующие стрип-распределения радиояркости по наблюдаемому источнику. Однако следует учитывать, что для различных радиальных сечений в синтезированной UV — плоскости (см. ниже) отсчеты фаз спектральных компонент ведутся от различных начал

— в каждом сечении оно задается условно для произвольно выбранной пространственной частоты. Поэтому получение двумерного изображения исследуемого источника путем двумерного Фурье-преобразования полученных спектральных данных по всей UV -плоскости будет невозможным, если не привести спектры различных стрип-распределений к единому началу координат.

Указанная проблема может быть разрешена при совместном применении метода апертурно-частотного синтеза и метода замыкания фазы, или (Γ) метода опорного объекта. Частный вариант для синтеза многолучевой антенной решетки путем совместного применения методов апертурно-частотного синтеза и замыкания фазы представлен в [16]. Необходимо отметить, что при получении радиоизображений космических объектов методом апертурно-частотного синтеза существует ограничение на максимальную рабочую длину волны в зависимости от различия длин баз интерферометров в комплексе, которое вызвано частотно-дисперсионными свойствами ионизированной части атмосферы. Влияние нейтральной части практически полностью устраняется. Поэтому применение метода апертурно-частотного синтеза совместно с методом замыкания фазы будет особо эффективно в см., мм и смм. диапазонах волн. На более длинных волнах целесообразно сочетание методов опорного объекта и замыкания фазы.

* Из приведенного рассмотрения следует, что для решения основной задачи наблюдательной радиоастрономии в астрофизических исследованиях методом длиннобазовой радиоинтерферометрии — получение радиоизображений космических объектов — необходимо использовать в качестве основы трехэлементный интерферометрический комплекс, позволяющий путем сочетания различных методов решать эту задачу в широком диапазоне волн.

Второй вопрос, возникающий после определения состава основного радиоинтерферометрического комплекса астрофизических исследований, о его рациональном размещении для достижения наибольшей эффективности — получение

ния хорошего качества радиоизображений космических объектов в возможно большей области неба и с возможно большим угловым разрешением. Качество изображений определяется степенью заполнения UV - плоскости. Как известно [18], двухэлементный интерферометр на UV - плоскости дает эллипс, описываемый уравнениями

$$U = \left(\frac{S_e}{\lambda}\right) \sin(h-H), \quad (7)$$

$$V = \left(\frac{S_p}{\lambda}\right) \cos b - \left(\frac{S_e}{\lambda}\right) \sin b \cos(h-H),$$

где h - часовой угол источника, H - часовой угол пересечения линии базы с небесной сферой,

$$\tan H = \frac{\cos \varphi_1 \sin \Lambda_1 - \cos \varphi_2 \sin \Lambda_2}{\cos \varphi_1 \cos \Lambda_1 - \cos \varphi_2 \cos \Lambda_2},$$

φ_i и Λ_i - широты и долготы пунктов интерферометра. Очевидно, что при малом числе элементов интерферометрического комплекса лучшее заполнение можно получить только при наблюдении источников в большом интервале часовых углов, используя изменения эффективных длин баз за счет вращения Земли. Так же легко сделать вывод о необходимости не только долготного, но и широтного разнесения элементов комплекса - разнесение их только по долготе не позволит получать двумерные изображения в весьма большой области неба с малыми склонениями источников (см. также [20]).

Для обзора наибольшей части неба при размещении данного комплекса на территории нашей страны необходимо размещать его в возможно более южных широтах. Отсюда просто решается вопрос о широтах пунктов: их южная граница составляет величину $\approx 40^\circ$ с.ш., северная

граница лежит ниже 60° с.ш., т.к. переход в большие широты практически не увеличивает полярную проекцию баз комплекса, но существенно снижает зону наблюдений источников южного полушария. Стремление максимального разнесения пунктов интерферометра по долготе, естественно целесообразное с учетом преимущественной долготной протяженности нашей страны и в целях получения наибольшего разрешения, вступает в противоречие с необходимостью наблюдения источников в большом интервале часовых углов для лучшего заполнения UV -плоскости. К примеру, интерферометр с наибольшей южной базой ($S \approx 7$ т.км) с пунктами в районах Крыма и Дальнего Востока позволяет под зенитным углом $\chi \leq 80^\circ$ наблюдать источник с $\delta = 0^\circ$ в течении $\pm 1^h$ с изменением эффективной длины базы всего на 25%, а интерферометр Крым-Кавказ ($S \sim 1500$ км) позволяет наблюдать источник с $\delta = 0^\circ$ в течение $\pm 4^h$ с изменением эффективной длины базы на 85%. Компромиссное и, на наш взгляд, наиболее оптимальное долготное разнесение пунктов основного радиointерферометрического комплекса астрофизических исследований составляет величину $\Delta \Lambda \sim 60^\circ$, $S_E \approx (4-5)$ тыс. км; на волне 1 см это дает предельное разрешение $\sim 5 \cdot 10^{-4}$ угл.сек.

Получение сверхвысокого разрешения, реализуемого в наземных условиях в ограниченном числе точек UV -плоскости, вероятно целесообразнее в рамках международного сотрудничества по проектам типа [21, 22], а для получения качественных радиоизображений космических объектов со сверх- и ультравысоким разрешением есть, по-видимому, только один путь - создание космических интерферометрических пунктов [23].

3. Фундаментальные астрометрические и геодинамические задачи, решаемые методом длиннобазовой радиointерферометрии космических объектов, включают задачи установления инерциальной системы небесных координат, инвариантной системы земных координат и оперативной связи небесной и земной систем координат. При этом для удовлетвори-

ция современных и перспективных требований науки и практики точность решения указанных задач должна достигать в угловых измерениях величины $(0,5 \div 1) \cdot 10^{-8}$ рад., в линейных измерениях - $(3 \div 10)$ см.

Решение этих задач базируется на определении параметров функций

$$\tau_t = \frac{1}{c} (\overline{S\vec{r}})_t + \Delta t(t) + \Delta T_{\text{атм}}(t) \approx \\ \approx \frac{1}{c} S_p \sin \delta + \frac{1}{c} S_E \cos \delta \sin(\Omega t + \alpha_s - \alpha) + \Delta t_0 + Kt \quad (8)$$

$$f_t = f_0 \frac{d\tau_t}{dt}$$

(где \overline{S} - вектор базы, \overline{r} - единичный вектор в направлении на источник, $\Delta t(t) \approx \Delta t_0 + Kt$ - расхождение шкал времени в пунктах интерферометра), формируемых путем измерения взаимной задержки $\tau_t = \frac{\Delta \varphi_{\text{атм}}}{\omega}$ (см. (1)) интерферируемых сигналов и частоты интерференции $f_t = f_0 \frac{d\tau_t}{dt}$ при наблюдении космических источников в некотором интервале углов [3], или дифференциальных функций

$$\varphi_g(t) = \frac{\omega}{c} (\overline{S\vec{r}_1} - \overline{S\vec{r}_2})_t + \omega \Delta T_{\text{атм},g}(t) \quad (9)$$

$$f_g(t) = f_0 \frac{d\varphi_g(t)}{dt}$$

получаемых при одновременном или квазиодновременном наблюдении двух источников [4].

Различают динамический (орбитальный) и геометрический (синхронный) способы решения координатных задач. В рамках динамического способа для разделения неизвестных параметров в (8, 9) используется различие функциональных связей измеряемых величин τ_t и f_t с разными входящими в них параметрами, проявляющееся тем лучше,

чем больше интервал времени (углов) наблюдений. По геометрическому способу необходимо получить одновременно столько независимых значений τ и f путем наблюдения на разных базах различных источников, чтобы число формируемых уравнений типа (8, 9) соответствовало числу определяемых параметров. Так, для определения координат источников при применении интерферометров с известными параметрами базы и синхронизованными шкалами времени достаточно иметь двухэлементный интерферометр при измерении τ и f или трехэлементный интерферометр с измерениями только τ . Или, имея координаты четырех космических источников, можно "мгновенно" определить пространственные параметры базы интерферометра в системе координат, закрепленной этими источниками, и так же расхождение местных шкал времени в пунктах этого интерферометра.

Однако в общей постановке, когда все астрометрические (α, δ), геодезические (S_p, S_E) и геодинамические (Ω, α_G) параметры, входящие в (8, 9) и задаваемые в системе мгновенного экватора Земли, считаются неизвестными — а именно это и будет на начальном этапе — решение такой комплексной задачи при минимальном составе интерферометрического комплекса возможно только в рамках динамического способа. И точность этого решения будет зависеть не только от номинального разрешения по угловым и линейным величинам данного интерферометрического комплекса (оно является определяющим в геометрическом способе), но, как было уже отмечено, и от интервала углов наблюдений требуемой группы источников, определяющего обусловленность формируемой системы уравнений.

При предоставлении приоритета чисто астрометрической задаче, она может быть решена с помощью только двухэлементного интерферометра. В записи в экваториальных координатах номинальное разрешение этих угловым величинам имеет значения;

$$\sigma_{\delta} = \frac{c \delta \tau}{S_{\varepsilon} \cos \delta \cos (\Omega t + \alpha_{\delta} - \alpha)} \quad (10)$$

$$\sigma_{\delta} = \frac{c \delta \tau}{S_{\rho} \cos \delta + S_{\varepsilon} \sin \delta \sin (\Omega t + \alpha_{\delta} - \alpha)}$$

по измерениям τ_t и

$$\sigma_{\alpha} = \frac{c \delta F}{D_{\varepsilon} \cos \delta \omega \Omega \cos (\Omega t + \alpha_{\delta} - \alpha)} \quad (11)$$

$$\sigma_{\delta} = \frac{c \delta F}{D_{\varepsilon} \sin \delta \omega \Omega \sin (\Omega t + \alpha_{\delta} - \alpha)}$$

по измерениям F_t , где $c \delta \tau$ и $c \delta F$ — погрешность измерений величин τ_t и F_t .

Из анализа этих выражений следует, что для получения равной точности измерений по обоим угловым координатам в среднем необходимо преимущественное, но не чисто долготное разнесение пунктов интерферометра по сравнению с широтным — для нашей страны долготное разнесение $\Delta \lambda$ должно быть в 3-4 раза больше широтного разнесения $\Delta \varphi$. При этом разнесение пунктов по долготе на экстремальное расстояние не дает положительного эффекта ни для геометрического, ни для динамического способа решения задачи: в первом случае с некоторого предела начинает уменьшаться вклад экваториальной проекции базы в разрешение по δ (см. (10), (11)), во втором — кроме этого еще и ухудшается обусловленность системы уравнений из-за уменьшения интервала допустимых углов наблюдений источников с малыми и отрицательными склонениями. В работе [24] проведен подробный анализ точности решения астрометрической и геодинамической задач по абсолютным интерферометрическим измерениям τ_t и F_t при различных длинах и

ориентациях базы интерферометра. Из результатов этой работы следует, например, что интерферометр с базой в 6 тыс. км ($\psi_1 = 50^\circ$; $\psi_2 \approx 44^\circ$; $\Delta\lambda \approx 87^\circ$) в целом дает худшие результаты, чем близкий к нему по ориентации интерферометр с базой 2 тыс. км. ($\psi_1 = 50^\circ$; $\psi_2 \approx 47^\circ$; $\Delta\lambda \approx 27^\circ$), что объясняется выше перечисленными причинами.

Из этой же работы [24] следует, что при оптимальном расположении пунктов двухэлементного интерферометра на территории нашей страны средневзвешенная точность угловых измерений по обоим координатам оценивается величиной $\sim 5 \cdot 10^{-2}$ угл.сек при единице веса ошибки измерений в 10^{-9} сек по τ_c и 10^{-3} Гц по f_c . Применение к этой же программе наблюдений дифференциальных измерений дает точность 10^{-2} угл.сек. Для получения большей точности в интерферометрический комплекс необходимо включить большее число элементов и оптимизировать программу наблюдений; можно ожидать, что при применении алгоритма дифференциальных измерений по [4], прогрессивных методов обработки, подобных [25], прямого измерения параметров атмосферы, например, методами радиотеплолокации [26] и корректного статистического накопления [27] с помощью трехэлементного интерферометра будет достигнута точность координатных определений $\sim 10^{-3}$ угл.сек. в задаче установления инерциальной системы небесных координат. В этой программе координаты источников, наблюдаемых в малом интервале углов (с отрицательными склонениями) и приполярных источников, имеющих в системе динамических уравнений малый вес, следует определять геометрическим способом после определения параметров интерферометра в рамках обратной астрометрической задачи. При этом из знакомого уже требования наблюдения источников в возможной большой зоне южного полушария в задаче определения их координат вытекает целесообразность наличия в координатном интерферометрическом комплексе меридианальной базы — в сочетании с измерениями на баз южного районирования с достаточно большой экваториальной проекцией это

позволит определять координаты источников до максимальных отрицательных склонений

$$|\delta| = \zeta_{\text{пред}} - \zeta_{\text{сп}}$$

где $\zeta_{\text{сп}}$ — широта расположения северного пункта интерферометра, $\zeta_{\text{пред}}$ — предельный зенитный угол наблюдений в этом пункте.

Корректность решения астрометрической задачи динамическим способом зависит от точности решения геодинамической задачи — задания параметров вращения Земли и движения полюсов, или, что то же самое, от точности установления динамической связи небесной и земной систем координат, т.к. решение астрометрической задачи мы производим с вращающейся Землей [27]. Рассмотрение решений геодинамической задачи для различных моделей движения полюса и вариаций скорости вращения Земли проведено в [28], где показано, что оптимальной структурой радиоинтерферометрического комплекса геодинамических исследований при минимальном составе комплекса является трехэлементный интерферометр. Желательно, чтобы в проекции на экваториальную плоскость две базы этого комплекса образовали прямой угол — это содействует лучшему определению направления движения полюса, и чтобы имелась достаточная проекция на ось вращения Земли — это содействует лучшему разделению эффектов, связанных с неравномерностью вращения Земли и движением полюса. Наконец, по самой постановке данная задача требует непрерывного наблюдения космических источников с различными склонениями, в большом интервале часовых углов, что вступает в противоречие с желанием максимального долготного разнесения пунктов интерферометрического комплекса. Здесь так же оптимально ограничиться в нашей стране разнесением пунктов по долготе на 4–5 тыс.км; по широте то же ограничение $\zeta_{\text{сп}} < 60^\circ$ с.ш. — переход на более высокие широты уменьшает диапазон углов видимости источников с малыми склонениями, дающих наибольший вес в задаче измере-

ния скорости вращения Земли, и существенно ухудшаются условия наблюдений.

Для установления земной системы координат, если бы Земля представляла собой твердое тело, достаточно было бы иметь три интерферометрических пункта, расположенных по возможности в плоскости одного большого круга с разнесением примерно на 120° . Эти пункты закрепляли бы в теле Земли некоторую плоскость, нормаль к которой и направления образуемых баз задавали бы координатные оси, а масштаб определялся длинами баз. Однако Земля не является твердым телом и поэтому инвариантная система земных координат, соответствующая "твердой Земле", может быть задана только по заданию взаимного положения большого числа точек, по возможности равномерно расположенных по поверхности земного шара. В пределах одного континента может быть задана только региональная географическая система координат; здесь так же для закрепления системы координат методами радиоинтерферометрии необходим трехэлементный комплекс. Безусловно необходимо, чтобы минимум один пункт этого комплекса размещался на материковой плите, чтобы в последующем с помощью межконтинентального интерферометра, организованного из таких пунктов, построить устойчивую систему земных координат; а так же организовать службу связи земной и небесной систем координат.

Определение длин и взаимных направлений баз интерферометрического комплекса для задания ими географической системы координат возможно, как уже указывалось, в рамках решения комплексной задачи наряду с определением координат космических источников. Если же координаты источников известны, то определение параметров баз интерферометров возможно либо путем единовременного наблюдения 4-х источников, либо путем одновременных наблюдений только двух источников в 3-х часовых углах. В первом случае мы получаем четыре измерения, позволяющие определить 3 параметра базы интерферометра и величину расхождения шкал времени в его пунктах; во втором — по 3-м ре-

результатам дифференциальных измерений определяются три параметра базы; S_p , S_B , d_B . Во всех случаях точности этих определений зависит от интервала склонений и часовых углов, в котором наблюдается выбранная группа источников. Анализ, проведенный в [30], показывает, что для получения лучших результатов по определению S_E и d_B необходимо наблюдать источники с квазинулевым склонением в интервале 6–8 часов, а для лучшего определения S_p необходимо наблюдать источник с большим склонением. Расчеты показывают, что при выборе оптимальной группы источников в интервале 6-ти часовых углов точность определения длин баз оценивается величиной $\delta S \sim 3 \text{ с} \times (\delta \tau_g)$, где $\delta \tau_g$ — погрешность дифференциальных временных измерений, а при наблюдении в интервале 4-х часовых углов $\delta S \sim 5 \text{ с} (\delta \tau_g)$, т.е. почти в два раза хуже, чем при наблюдении в 6-ти часовом интервале. Однако при уменьшении баз интерферометрического комплекса в целях увеличения интервалов углов наблюдений космических источников с некоторого предела начинает увеличиваться погрешность определений взаимных направлений баз и относительная погрешность измерения их длин. Поэтому для задания географической системы координат в нашей стране так же целесообразно ограничиться долготным разнесением пунктов интерферометрического комплекса на величину $\sim 60^\circ$ при максимальном широтном разнесении. Еще раз напомним, что хотя бы один пункт интерферометрического комплекса для задания региональной географической системы координат должен быть размещен на материковой плите, вдали от сейсмических зон. Это же позволит использовать данный пункт в качестве базового элемента радиointерферометрических средств сейсмических исследований.

4. Заключение. Мы рассмотрели совокупность задач, которые могут решаться методами длиннобазовой радиointерферометрии и которые теснейшим образом связаны между собой. Действительно, для закрепления космическими

объектами инерциальной системы небесных координат необходимо предварительное исследование их структуры для соответствующего отбора [29], для применения метода опорного объекта в астрофизических исследованиях необходимо предварительное определение координат опорных источников, корректность решения астрометрической задачи зависит от точности геодинимических определений [27], для установления земной системы координат необходимо предварительное закрепление инерциальной небесной системы координат и текущее задание ее связи с вращающейся Землей и т.д. Анализ путей их решений, хотя он и носит в целом эвристический характер, мы старались подкрепить ссылками на конкретные расчетные работы, и этот анализ показал практически полную однотипность оптимальной для каждой задачи структуры интерферометрического комплекса при его минимальном составе.

Для удовлетворения совокупным требованиям рассматриваемых задач радиоинтерферометрический комплекс при минимальном составе должен быть трехэлементным, с размещением центрального пункта этого комплекса, а при равнозначности — одного из пунктов на материковой плите вдали от сейсмоактивных зон. Южная граница размещения интерферометрического комплекса на территории нашей страны определена широтой $\varphi \sim 40^\circ$ с.ш., северная граница не должна заходить за широту $\varphi \sim 60^\circ$ с.ш. Долготное разнесение пунктов в целях обеспечения достаточной зоны видимости источников с различными склонениями не должно превышать величины $\Delta \lambda \approx 60^\circ$.

Как возможный вариант мы рассмотрели районирование пунктов этого комплекса в Горьковской области, на Кавказе и в Прибайкалье. В прилагаемых рисунках, выполненных Г. Абрамяном, показаны пути проекции баз этого комплекса для склонений $\delta = 90^\circ; 60^\circ; 30^\circ$; с $\tau_{пред} = 80^\circ$ и для $\delta = 0^\circ$ и -20° с $\tau_{пред} = 85^\circ$. там же отмечены интервалы видимости источников в местном времени г. Горького. Как видно, такое расположение обеспечивает доста-

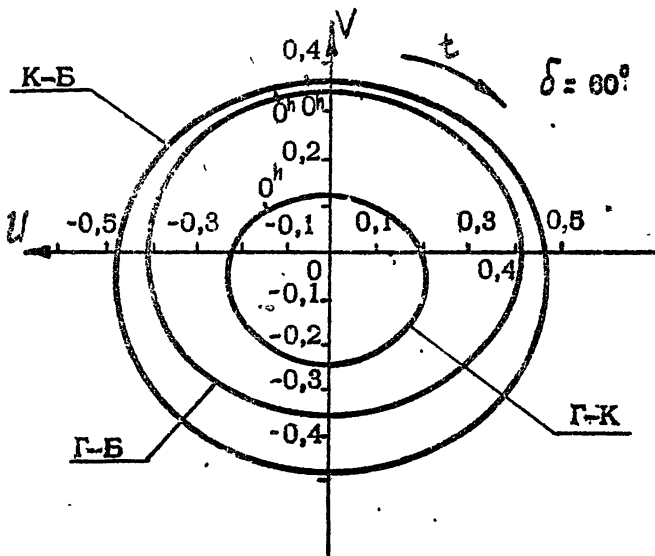
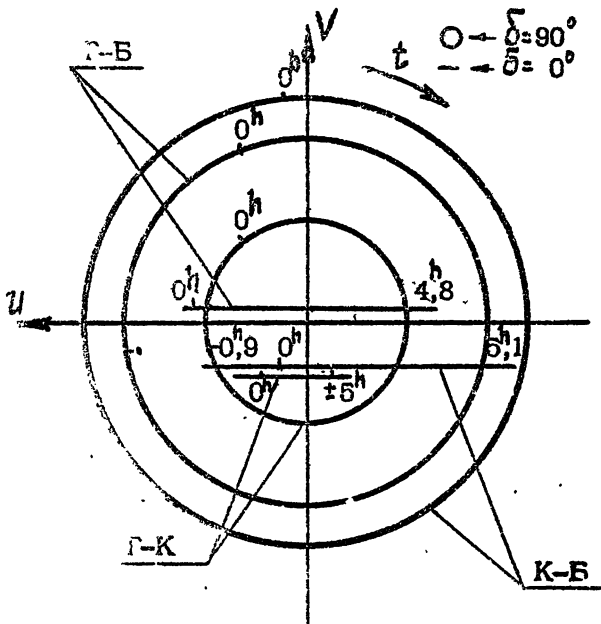
точно симметричное заполнение UV - плоскости и достаточно большой интервал видимости источников с различными склонениями. Предельный размер апертуры такого комплекса ~ 4.5 тыс. км., зона обзора неба по δ от $+90^\circ$ до -30° при $Z_{\text{пред}} 85^\circ$, включая плоскость эклиптики.

Л И Т Е Р А Т У Р А

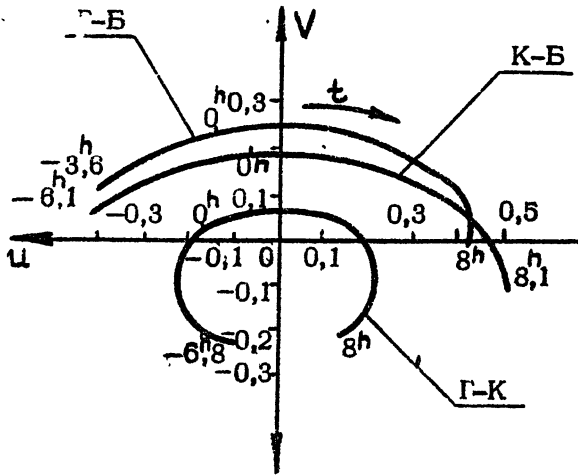
1. Л.И.Матвеевко, Н.С.Кардашев, Г.Б.Шаломицкий. Изв. ВУЗов, Радиофизика, 8, 4, 651, 1965.
2. Л.И.Матвеевко. Докторская диссертация., М., ИКИ АН СССР, 1978.
3. А.Е.Е. Rogers, Radio Science, 5, 10, 1239, (1970).
4. В.А.Алексеев, Б.Н.Липатов, Б.В.Щекотов. Изв. ВУЗов, Радиофизика, 19, 11, 1669 (1976).
5. В.А.Алексеев, "Исследование вопросов радиоинтерферометрии высокого углового разрешения", кандидатская диссертация, ГГУ, г. Горький, 1970.
6. J. M. Moran, reprint N 138, COSPAR, 1974.
7. В.С.Троицкий, В.А.Алексеев, В.Н.Никонов, УФН, т.117, вып. 2, октябрь 1976.
8. М.Н.Сохен, Ap. Letters, V.12, p.81, (1972)
9. J. J. Shapi
10. Ю.Н.Парийский, А.А.Стоцкий, Изв. ГАО, 188, 1951 (1972).

11. В.А.Алексеев. Радиотехника и электроника, 14, 6, 1091, (1969).
12. D.H.Rogstag, a reprint from App.Lied Optics, v.7, N 4, April, 1968.
13. H.Fort, N.Yce, Astron. and Astroph., 50, 19, 1976.
14. Jennison R.G., Monthly Not. Roy. Astron. Soc., 118, 3, 276 (1958).
15. В.А.Алексеев. Изв. ВУЗов, Радиофизика, 12, 4, 491, (1969).
16. В.А.Алексеев. Тезисы докладов XI Всесоюзной радиоастрономической конференции по аппаратуре, антеннам и методам, стр. 211, Изв. АН АРМ ССР, г. Ереван, 1978.
17. Stanley G.J. Slee O.E., Austr.J.Sci.Res. A-3., 234 (1950).
18. О.М.Кочулева, В.Я.Крейнович, А.М.Финкельштейн. Тезисы докладов XI Всесоюзной радиоастрономической конференции по аппаратуре, антеннам и методам, стр. 222, Изв. АН АРМ.ССР, Ереван, 1978.
19. Rowson B., Mont.Not.Roy.Austr.Soc., 125, 2, 177 (1963).
20. Фомалонт, М.К.Х.Райт, в сб. Галактическая и внегалактическая радиоастрономия, Мир, 1976.
21. "VLBI using a glostationary Sattellite" ESA OPFS (78) 15, Paris, 28 April, 1978, Yen c. etal., Science, 198, 289 (1977).

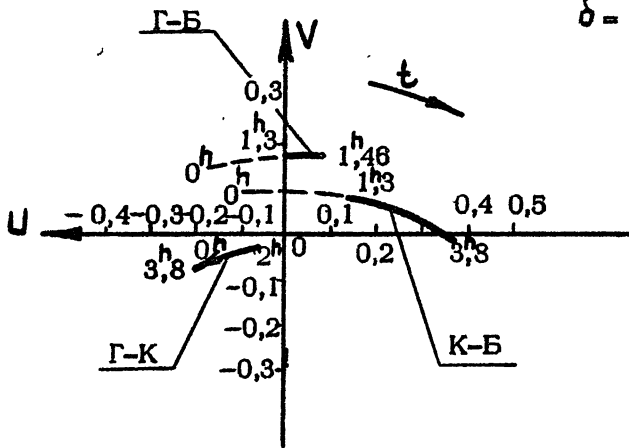
22. R.T. Schilizzi, A report on V.L.B.I. in Europe, Radio Observatory, Dwingeloo, the Netherlands, 1977.
23. В.И.Буякс и др., Космические исследования, 16, 6, (1978).
24. И.Д.Жонголович и др. Труды ИТА, вып. 18, 19, Наука, Ленинград, (1977).
25. И.Д.Жонголович, В.И.Валяев, Т.Б.Сабанина. Письма в А.ж., 4, 1, 38 (1978).
26. D.H. Staelin, Proc. IEEE, 57, 427, (1969).
27. В.А.Алексеев. "Об оптимальной программе РСДБ-наблюдений для построения инерциальной системы небесных координат", Труды 21-ой астрометрической конференции СССР, Ташкент, 1978 (в печати).
28. В.А.Алексеев, Б.Н.Липатов, А.С.Сизов. "Определение параметров вращения Земли, движения поллсов и астрономических постоянных с помощью РСДБ", там же.
29. В.А.Алексеев. "О выборе радиомаяков для установления инерциальной системы небесных координат", там же.
30. В.А.Алексеев, Б.С.Иванов, "Об оптимальной программе РСДБ-наблюдений для установления фигуры Земли и ее эволюции". Сообщение на Всесоюзной школе по радиоастрометрии Капизели, 1978.



$\delta = 30^\circ$



$\delta = -20^\circ$



Обозначения: Γ - Горький,
 K - Кавказ,
 B - Байкал.