

ВОЗМОЖНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА ОПОРНОГО ОБЪЕКТА ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ФАЗОСТАБИЛЬНОЙ МНОГОЭЛЕМЕНТНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С БОЛЬШИМИ БАЗАМИ

А. Ф. Дравских, О. М. Кошелева, А. М. Финкельштейн,
П. А. Фридман

Рассмотрена возможность восстановления фазы интерференционного отклика методом опорного объекта в том типичном для многоэлементной системы случае, когда опорный и исследуемый источники наблюдаются под разными зенитными углами. Показано, что он может быть эффективно применен к координатным задачам и задачам построения двумерных изображений источников, если его дополнить радиометрическими измерениями электрической толщины тропосферы. Рассмотрен вопрос об оптимальной структуре N -элементной фазостабильной интерферометрической сети с большими базами, обеспечивающей предельное угловое разрешение $0''0001$ в сантиметровом диапазоне длин волн. Показано, что оптимальной является система, сформированная из 9—12 антенн диаметром 30—25 м.

The possibility is discussed of interferometer response reconstruction with the aid of reference object method in the case when reference source and source under consideration are observed under different zenith angles. This method may be effectively applied to coordinate problem and for two-dimensional image reconstruction if the radiometric measurements of troposphere electric depth are used. The question of optimal structure for N -element phase-stable interferometer array with the long baselines and with $0''0001$ resolution is discussed. It is shown that the optimal system may be formed by 9—12 antennas with 30—25 m in diameter.

1. Вся полезная информация об источнике, наблюдаемом с помощью радиointерферометра, извлекается путем изучения квадратичных по полю величин. В корреляционном интерферометре, в котором перемножаются поля, такой величиной является отклик $R(t)$ на протяженный источник с распределением радиояркости, сглаженным диаграммой антенны $I(\bar{\sigma})$:

$$R(t) = V \exp \{ (2\pi/\lambda) j (\bar{\rho}\bar{k}) \}, \quad (1)$$

$$V = \int I(\bar{\sigma}) \exp \{ (2\pi/\lambda) j (\bar{d}\bar{\sigma}) \} d\sigma \quad (2)$$

— функция видности; $\bar{\rho}$ — вектор базы интерферометра; \bar{k} — единичный вектор направления на источник и $\bar{d} = \bar{k} \times (\bar{\rho} \times \bar{k})$ — проекция вектора базы на плоскость, перпендикулярную к направлению на источник (UV -плоскость); σ — текущая координата источника.

Функция видности является Фурье-преобразованием распределения радиояркости, почему интерферометр можно уподобить узкополосному фильтру пространственных частот, «настроенному» на частоту $|\bar{d}|/\lambda$, так что суточное вращение Земли «перестраивает» частоту этого фильтра в пределах от 0 до ρ/λ . Для задач, связанных с позиционными измерениями, которые ведутся по точечным источникам, $V = V_0$, основную астрометрическую информацию несет фаза отклика точечного источника $\Phi = (2\pi/\lambda)(\bar{\rho}\bar{k})$, которая, будучи выражена в линейной мере, представляет временную задержку $\tau = (\lambda/2\pi c)\Phi$, которая определяется разностью хода лучей от источника к антеннам интерферометра. В интерферометрии со сверхдлинными базами фаза реального интерферометрического отклика $\arg R$ содержит неучитываемые фазовые набеги из-за не-

стабильности стандартов частоты ($\Phi_{\text{ан}}$) и флуктуаций электрической толщины тропосферы ($\Phi_{\text{троп}}$):

$$\arg R = (2\pi/\lambda) [(d\bar{s}) + (\bar{p}k) + c\tau_{\text{ан}} + c\tau_{\text{троп}}] \equiv \Phi(U, V) + \Phi_{\text{геом}} + \Phi_{\text{ан}} + \Phi_{\text{троп}}. \quad (3)$$

Это обстоятельство ведет к далеко идущим следствиям для эффективного использования интерферометра в качестве инструмента, строящего изображения и определяющего положения космических источников.

Прежде всего, измерение только амплитуды функции видности $|V|$ позволяет получать лишь некоторые представления о структуре и размерах исследуемого источника, и то в том случае, когда имеется какая-либо априорная информация о его приближенной модели. Далее, случайные набег фазы огра-

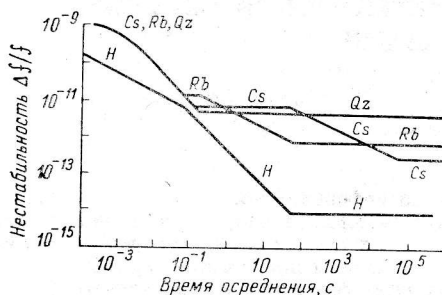


Рис. 1. Характеристики основных стандартов частоты, используемых в радиоастрономии [4].

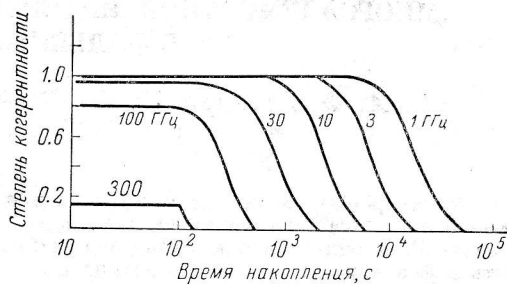


Рис. 2. Зависимость степени когерентности РСДБ с водородным стандартом.

ничивают время когерентного накопления, что резко уменьшает предельную чувствительность системы и не позволяет исследовать слабые источники. Наконец, отсутствие фазовой информации позволяет определять положение источников лишь с точностью до десятков—сотен лепестков диаграммы интерферометра, в то время как современные телескопы с заполненными апертурами и фазостабильные решетки с малыми базами определяют положение объекта до сотых долей диаграммы.

Действительно, среднеквадратичные ошибки в измерении фазы $\langle\Phi\rangle$ и временной задержки $\langle\tau\rangle$, определяемые аддитивными шумами аппаратуры, равны:

$$\langle\Phi\rangle = 21/Q, \quad \langle\tau\rangle = \sqrt{3}/\pi \Delta f Q, \quad (4)$$

где для N -элементного интерферометра отношение сигнала к шуму

$$Q = (\pi/32) (\sqrt{\Delta f T}/kT_{\text{ш}}) d^2 \sqrt{N(N-1)} F; \quad (5)$$

d — диаметр антенны; F — спектральная плотность потока; Δf — полоса регистрации; T — время накопления и $T_{\text{ш}}$ — шумовая температура системы. Таким образом, ошибки $\langle\theta_{\tau}\rangle$, $\langle\theta_{\Phi}\rangle$ в определении углового положения источника при измерениях τ и Φ связаны соотношением

$$\langle\theta_{\tau}\rangle/\langle\theta_{\Phi}\rangle = 2\sqrt{3} f/\Delta f, \quad (6)$$

где f — частота принимаемого сигнала. В существующих радиоинтерферометрических системах регистрации $\Delta f \leq 100$ МГц, так что для длин волн $\lambda = 1 \div 5$ см, $\langle\theta_{\tau}\rangle/\langle\theta_{\Phi}\rangle = 4000 \div 200$.

2. Фазовые набег аппаратурного происхождения связаны в основном с нестабильностью стандарта частоты, который в системе радиоинтерферометра со сверхдлинной базой формирует гетеродинный сигнал (рис. 1). Самая высокая долговременная стабильность характерна для водородного стандарта. В новейших разработках нестабильность водородного стандарта не превышает $3 \cdot 10^{-15}$, и предполагается, что она может быть уменьшена до 10^{-15} . Последнее означает, что, например, на волне $\lambda = 5$ см когерентное накопление сигнала возможно в течение 15 ч, так что за это время стандарты на двух пунктах ра-

зойдутся не более чем на один период. Такая стабильность позволяет с аппаратной точки зрения реализовывать прямые фазовые измерения. В сантиметровом диапазоне длин волн для водородного стандарта с нестабильностью 10^{-14} время когерентного накопления составляет 10^3-10^4 с (рис. 2).

Если аппаратные фазовые набеги могут быть уменьшены за счет применения высокостабильных стандартов или путем фазовой привязки стандартов через спутник-ретранслятор [1], то фазовые набеги, связанные со средой распространения радиоволн, не могут быть подавлены чисто аппаратными средствами. На длинах волн $\lambda \leq 10$ см основную роль при распространении радиоволн от источника к антеннам играют флуктуационные эффекты тропосферы, которые на больших базах приводят к фазовым набегам, существенно большим периода (рис. 3).

Влияние тропосферных эффектов, так же как и аппаратных, можно существенно

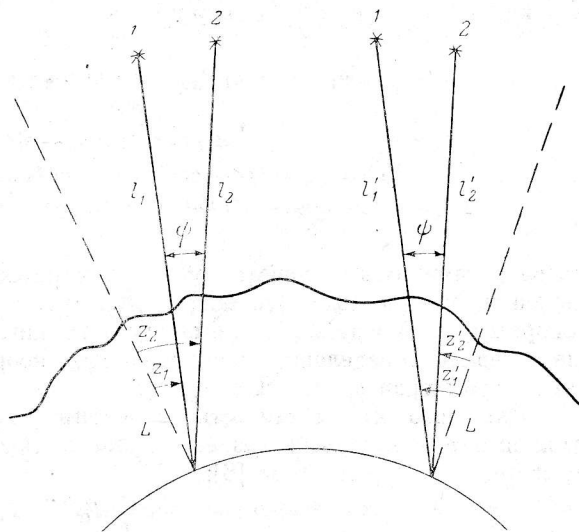
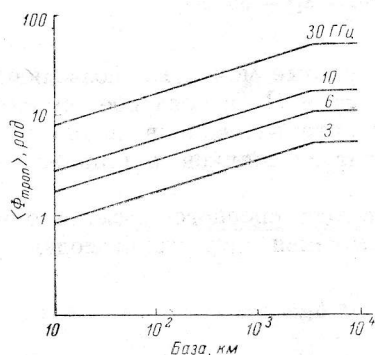


Рис. 3. Тропосферный набег фазы в зените.

Рис. 4. К идее метода опорного объекта.

ослабить, если использовать метод опорного объекта [2]. Суть этого метода заключается в том, что при приеме сигнала от исследуемого источника 1 одновременно или квазисовременно с ним наблюдается опорный источник 2, отстоящий от исследуемого на угловое расстояние ψ , и в качестве наблюдаемой величины формируется разность фаз интерференционных откликов $\Delta\Phi = \arg R_1 - \arg R_2$ (рис. 4). При этом можно ожидать, что при достаточно малых ψ и промежуточных времени, в течение которых формируется $\Delta\Phi$, остаточные фазовые набеги $\Delta\Phi_{\text{троп}}$ и $\Delta\Phi_{\text{ан}}$ будут составлять малую долю периода.

Метод опорного объекта в одинаковой степени эффективно можно применять как к задачам построения изображений протяженных источников, так и к задачам определения координат точечных источников. Этим он выгодно отличается от метода «фазы замыкания» [3], который позволяет подавить влияние тропосферы и нестабильности стандартов за счет полной потери координатной информации.

Применительно к задачам построения изображений метод опорного объекта особенно удобен, если опорный источник точечный, $\Phi_2(U, V) = 0$ и

$$\arg R_1 - \arg R_2 = \Phi_1(U, V) + (2\pi/\lambda) \bar{\rho} (\bar{k}_1 - \bar{k}_2) + \Delta\Phi_{\text{ан}} + \Delta\Phi_{\text{троп}}. \quad (7)$$

Таким образом, искомая фаза $\Phi_1(U, V)$ может быть определена с точностью до постоянного слагаемого:

$$\Delta\Phi_{\text{геом}} = (2\pi/\lambda) \rho_p (\sin \delta_1 - \sin \delta_2) + (2\pi/\lambda) \rho_o \{ \cos \delta_1 \cos (\Omega t + \alpha_o^0 - \alpha_1) - \cos \delta_2 \times \\ \times \cos (\Omega t + \alpha_o^0 - \alpha_2) \}, \quad (8)$$

где ρ_o, ρ_p — экваториальная и полярная проекции базы; α, δ — экваториальные координаты источника; α_o^0 — прямое восхождение базы в момент $t=0$ и Ω —

угловая скорость вращения Земли. В результате искомое распределение радиояркости будет

$$I(\bar{\sigma}) \propto {}^2F(R_1/R_2), \quad (9)$$

где 2F — двумерное Фурье-преобразование.

Применительно к задачам определения координат метод опорного объекта представляет собой способ определения относительных положений источников [5] и аналогичен широко распространенной в фотографической астрометрии процедуре фотографирования источника в поле опорных звезд. Поскольку наблюдаемые источники точечные, то $\Delta\Phi = \Delta\Phi_{\text{геом}}$ и, если отсчитывать прямые восхождения источников от опорного,

$$\Delta\Phi_{12} = (2\pi/\lambda) A_{12} + (2\pi/\lambda) B_{12} \cos(\Omega t + C_{12} + \alpha_0^0), \quad (10)$$

где

$$\begin{aligned} A_{12} &= \rho_p (\sin \delta_1 - \sin \delta_2); \\ B_{12} &= \rho_e (\cos^2 \delta_1 + \cos^2 \delta_2 - 2 \cos \delta_1 \cos \delta_2 \cos(\alpha_2 - \alpha_1))^{1/2}; \\ C_{12} &= \arctg \{ \cos \delta_1 \sin(\alpha_2 - \alpha_1) / (\cos \delta_1 \cos(\alpha_2 - \alpha_1) - \cos \delta_2) \}. \end{aligned} \quad (11)$$

Четыре независимых отсчета $\Delta\Phi$, полученных в разные моменты, позволяют определить обобщенные параметры A_{12} , B_{12} , $C_{12} + \alpha_0^0$ и Ω , а попарное (вместе с опорным) наблюдение минимальной группы из пяти источников полностью решает задачу определения относительных координат источников и геодинемических параметров ρ_e , ρ_p , Ω и α_0^0 .

3. Для того чтобы оценить эффективность метода опорного объекта при подавлении тропосферных фазовых набегов, воспользуемся следующей моделью структурной функции фазы [6]:

$$D_\Phi(\rho) = (2\pi/\lambda)^2 \cdot \begin{cases} C_I^2 \rho^{5/3}, & L_0 < \rho < L_1, \\ C_I^2 \rho^{2/3}, & L_1 < \rho < L_2, \\ C_L^2 L_2^{2/3}, & L_2 < \rho, \end{cases} \quad (12)$$

где $C_I = 1.7 \cdot 10^{-5} \text{ см}^{5/3}$, $C_L = 1.3 \cdot 10^{-2} \text{ см}^{2/3}$, $L_0 = 1 \text{ см}$, $L_1 = 5.6 \text{ км}$, $L_2 = 3000 \text{ км}$.

Наиболее эффективно использование этого метода при наблюдении источников, находящихся под одинаковыми зенитными углами на обеих антеннах интерферометра, когда геометрические длины трасс от обоих источников до антенны одинаковы: $l_1 = l_2$, $l'_1 = l'_2$. В этом случае, как ясно из качественных соображений и как следует из точной теории [7], тропосферные флуктуации эйконала, вызываемые тропосферными неоднородностями с масштабами, большими $\rho_{\text{эф}} \approx L\psi + v\Delta T$ ($L = 6 \text{ км}$ — геометрическая высота тропосферы; v — скорость переноса тропосферных неоднородностей, величина которой будет принята равной 10 м/с ; ΔT — время переброса антенны с одного источника на другой и $\psi \approx |z_1 - z_2| \approx |z'_1 - z'_2| < 1$), будут вычитаться. Как следствие, дисперсия случайного набегу дифференциальной фазы будет равна

$$\langle |\Delta\Phi|^2 \rangle \approx \frac{1}{2} \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 \left(\frac{1}{\cos^2 z_1} + \frac{1}{\cos^2 z'_1} \right) \cdot \begin{cases} C_I^2 \rho_{\text{эф}}^{5/3}, & \text{если } Tv < \rho_{\text{эф}} \\ C_I^2 \rho_{\text{эф}}^2 / (vT)^{1/3}, & \text{если } Tv > \rho_{\text{эф}} \end{cases} \quad (13)$$

Нетрудно видеть, что даже для углов $\psi \approx 0.5$, $\langle \Delta\Phi \rangle < 2\pi$ в сантиметровом диапазоне длин волн (рис. 5).

Однако ситуация, когда источники наблюдаются одновременно или почти одновременно под одинаковыми зенитными углами на обоих пунктах интерферометра, весьма редка, а для многоэлементного интерферометра, работающего в режиме сети, вообще нереализуема. В случае же, когда источники наблюдаются под разными зенитными углами, основной вклад в фазовый набег определяется [дополнительно к фазовому набегу (13)] геометрической разностью длин трасс

l_1, l_2 и l'_1, l'_2 и, как нетрудно показать, дисперсия дифференциальной фазы в этом случае для баз $\rho \geq L_2$ будет равна

$$\langle [\Delta\Phi]^2 \rangle \approx \frac{1}{2} \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 C_L^2 L_2^{2/3} \left\{ \left(\frac{1}{\cos z_1} - \frac{1}{\cos z_2} \right)^2 + \left(\frac{1}{\cos z'_1} - \frac{1}{\cos z'_2} \right)^2 \right\}$$

$$\psi < 1 \approx \frac{1}{2} \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 C_L^2 L_2^{2/3} \left(\frac{\sin^2 z_1}{\cos^4 z_1} + \frac{\sin^2 z'_1}{\cos^4 z'_1} \right) \psi^2. \quad (14)$$

Существенное различие оценок (14) и (13) заключается в том, что здесь тропосферный фазовый набег определяется в основном неоднородностями с самыми большими масштабами, в результате чего тропосферные ограничения на возможность определения фазы отклика становятся значительно более жесткими. При $\lambda = 5$ см они приводят к набегу $\langle \Delta\Phi \rangle > 180^\circ$ уже при $\psi \geq 7^\circ$ (рис. 6).

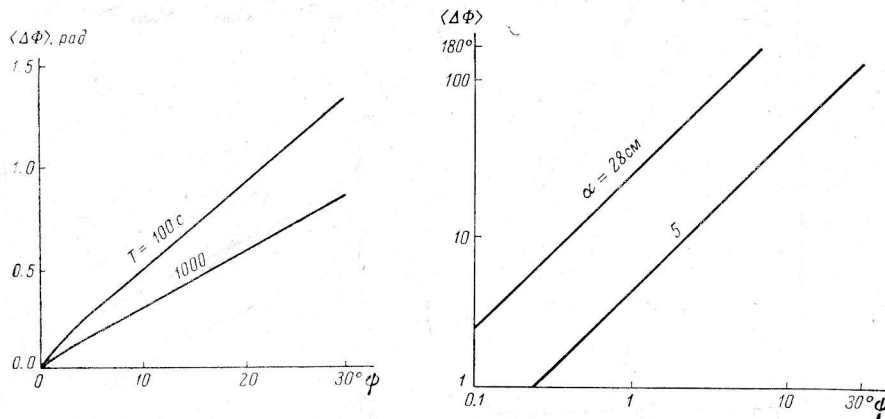


Рис. 5. Фазовые набег при наблюдении источников под одинаковыми зенитными углами.
 $\lambda = 5$ см, $z_{1,2} = 60^\circ$, $z'_{1,2} = 34^\circ$, $\rho = 3000$ км.

Рис. 6. Фазовые набег при наблюдении источников под разными зенитными углами.
 $\lambda = 5$ см, $z_1 = 60^\circ$, $z'_1 = 34^\circ$, $\rho = 3000$ км.

В случае, когда источники наблюдаются под разными зенитными углами, ослабить влияние тропосферы можно, если дополнить метод опорного объекта специальными измерениями электрической толщины тропосферы на пунктах системы. Если предположить, что тропосфера изотропна и имеет малую оптическую толщину, то будет существовать почти линейная связь между яркостной температурой атмосферы в линиях паров воды (22.235 ГГц) и эйконалом. Радиометрические измерения вблизи резонансной линии (обычно на частотах 21 и 31 ГГц) позволяют, как это следует из отдельных экспериментов [8, 9], определить эйконал в зените с точностью 1—1.5 см и, таким образом, частично скорректировать тропосферный набег дифференциальной фазы (рис. 6).

4. Поскольку для подавления тропосферных фазовых набегов требуется наблюдать источники, находящиеся на относительно малых угловых расстояниях друг от друга, интерферометрическая система должна обладать высокой чувствительностью по потоку. При заданных параметрах системы регистрации это означает необходимость сформировать достаточно большую синтезированную площадь.

Согласно (4), (5) и (14), дисперсия ошибки в определении дифференциальной фазы при наблюдениях источников с одинаковыми потоками на базе $\rho \geq L_2$ равна

$$\langle [\Delta\Phi]^2 \rangle = 2/Q^2 + (\alpha/\lambda)^2 \psi^2, \quad (15)$$

где α — тропосферный набег, величина которого зависит от зенитных углов и наличия специальных измерений эйконала.

Очевидно, что на больших взаимных угловых расстояниях ψ ошибка $\langle \Delta\Phi \rangle$ определяется (при заданной чувствительности по потоку) тропосферными эф-

фектами, а при малых ψ — аддитивными шумами аппаратуры. Следовательно, можно указать то ψ , при котором суммарная ошибка $\langle \Delta\Phi \rangle$ минимальна.

Используя соотношение поток—число источников

$$F/F_0 = (n_0/n)^{2/3}, \quad (16)$$

где для источников с угловыми размерами, меньшими 0,001, $n_0=50$, $F_0=0.1$ ян [9], и тот факт, что $\psi \approx \sqrt{1/n}$, будем иметь следующее выражение для минимальной ошибки измерения дифференциальной фазы (при следующих параметрах системы: $T_{ш}=50$ К, $\Delta f=50$ МГц и $\lambda=5$ см):

$$\langle \Delta\Phi \rangle_{\min} \approx \sqrt{2}/Q_{\text{опт}}; \quad Q_{\text{опт}} \approx \frac{S_{\text{эф}}^{3/7} T^{3/14}}{5\alpha^{4/7}}, \quad (17)$$

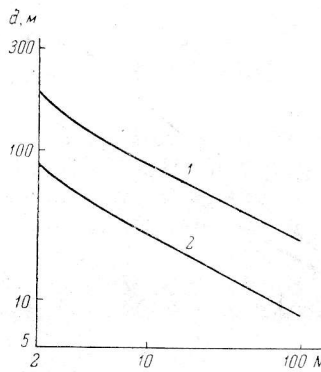
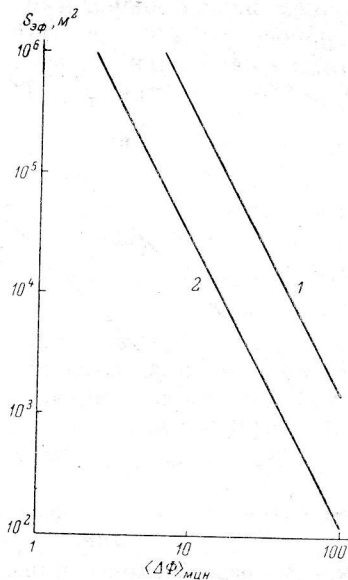


Рис. 7. Зависимость ошибки в измерении дифференциальной фазы от синтезированной площади системы.

α , см: 1 — 28, 2 — 5.

Рис. 8. Зависимость диаметра антенн от числа элементов N в системе с $\langle \Delta\theta \rangle = 0,0001$.

α , см: 1 — 28, 2 — 5.

где

$$S_{\text{эф}} = \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{N(N-1)} \quad (18)$$

— геометрическая площадь системы. Для дальнейших оценок примем во внимание, что при $z \leq 60^\circ$, согласно (14),

$$\alpha \approx \begin{cases} 28 \text{ см, если не ведутся измерения эйконала;} \\ 5 \text{ см, если ведутся измерения эйконала.} \end{cases} \quad (19)$$

На рис. 7 представлена зависимость $\langle \Delta\Phi \rangle_{\min}$ от общей синтезированной площади системы $S_{\text{эф}}$ при $T=600$ с.

На базе $\rho=3000$ км измерение дифференциальной фазы с точностью $\langle \Delta\Phi \rangle \approx 11^\circ$ соответствует измерению относительных угловых расстояний с точностью $\langle \Delta\theta \rangle = 0,0001$, а эффективная площадь системы, обеспечивающей такое угловое разрешение,

$$S_{\text{эф}} \approx \begin{cases} 5,9 \cdot 10^4 \text{ м}^2, \text{ если } \alpha = 28 \text{ см;} \\ 6 \cdot 10^3 \text{ м}^2, \text{ если } \alpha = 5 \text{ см.} \end{cases} \quad (20)$$

Отсюда видна та значительная роль, которую играют радиометрические измерения эйконала. Они позволяют на порядок уменьшить необходимую синтезированную площадь системы.

5. Очевидно, что имеется множество вариантов формирования площади, удовлетворяющей условию (20) (рис. 8). Из них предельными являются варианты «вавилонской башни» (большие d и малые N) и «большого скачка» (большие N и малые d), точные границы между которыми будут установлены ниже.

Для того чтобы выбрать оптимальную комбинацию N и d , необходимо составить, хотя бы качественно, представление о стоимости каждой из них. Если рассматривать ситуацию в самых общих чертах, то прежде всего необходимо отметить, что стоимость системы складывается из стоимости антенн и стоимости аппаратуры, которые различным образом зависят от N и d . Поскольку стоимость антенны пропорциональна $d^{2.8}$ [11], при заданной общей геометрической площади системы Nd^2 стоимость ее антенной части $S_A \propto Nd^{2.8} \propto N^{-0.4}$ убывает с ростом N . С другой стороны, стоимость аппаратной части системы растет с ростом N , так что между вариантами «вавилонской башни» и «большого скачка» должен существовать оптимум по стоимости.

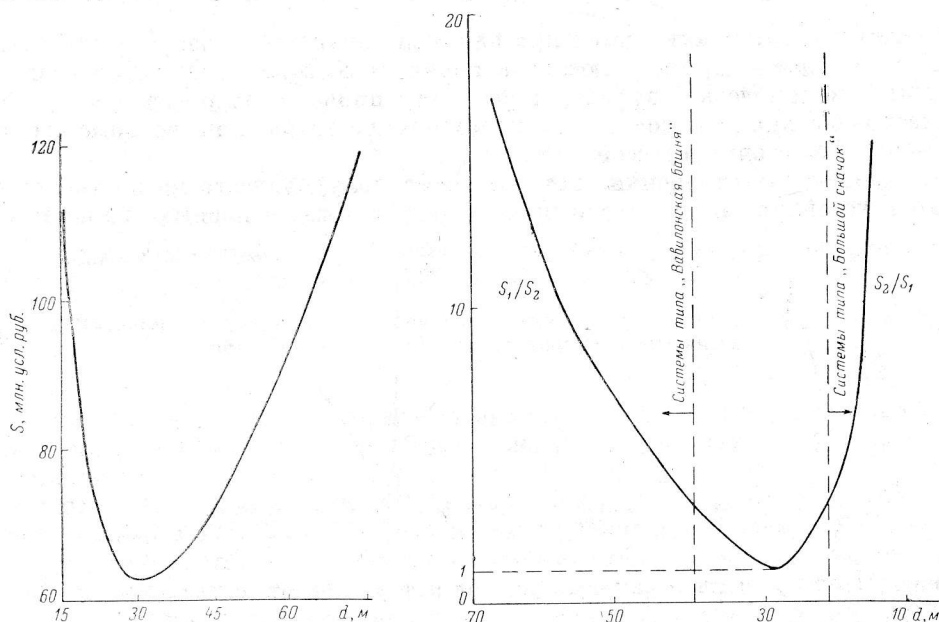


Рис. 9. Зависимость стоимости системы с $\langle \Delta\theta \rangle = 0.0001$ от диаметра антенн.

Рис. 10. Соотношение затрат на антенны S_1 и аппаратуру S_2 системы с $\langle \Delta\theta \rangle = 0.0001$ в зависимости от диаметра антенн.

Рассмотрим эту ситуацию подробнее, представив стоимость S системы в виде (S — в миллионах условных рублей, d — в метрах)

$$S = 45N(d/70)^{2.8} + N(1 + 0.5 + 0.05) + (N(N-1)/2)0.05 + N(d/70). \quad (21)$$

Здесь первый член связан со стоимостью антенн, включая амортизационные расходы за 10 лет, второй — со стоимостью аппаратуры (приемники, линии задержки, пункты связи с ИСЗ, пункты измерения эйконала), третий — со стоимостью корреляторов и четвертый — с эксплуатационными расходами за 10 лет.

Принимая во внимание (20), нетрудно видеть, что система с минимальной стоимостью может быть образована 9—12 антеннами с диаметрами $d=30 \div 25$ м соответственно (рис. 9). Интересно отметить, что антенны диаметром $d=25$ м были выбраны в качестве модульных элементов при строительстве системы VLA [12] и при проектировании глобальных интерферометрических сетей в США [13] и Канаде [14]. Ясно, что оптимальной по стоимости оказывается та система, для которой экономические затраты на антенны оказываются того же порядка, что и на аппаратуру (рис. 10). Как видно из рис. 11, системы, сформированные из антенн относительно небольших размеров, являются оптимальными и по стоимости единицы информации, в качестве которой можно взять число обнаруживаемых на стерадиан источников n . Ниже приведены наиболее важные параметры, характеризующие оптимальную систему, а на рис. 12 — зависимость ее разрешающей способности от взаимных угловых расстояний между наблюдаемыми источниками (характерный размер баз $\rho=5000$ км).

Диаметр антенн, м	30
Число антенн	9
Отношение стоимости антенн к стоимости аппаратуры	1.3
Минимальный обнаружимый поток источника ($Q=5$, $T=600$ с), мян	2.6
Число видимых источников на стерадиан	10^4
Угловое расстояние между источниками ($Q=5$)	$0^\circ.52$
Число источников на стерадиан, положение которых можно определить с точностью $0^\circ.0001$	480

Отметим, что стоимость систем при наличии аппаратуры, измеряющей эйконал, S_1 и без нее — S_2 отличаются на порядок: $S_2/S_1 \approx 14$. Отсюда виден тот гигантский экономический эффект, к которому приводит включение в систему радиометров на линии паров воды, экономические затраты на которые составляют менее 1% стоимости всей системы.

Приведенные выше оценки, хотя и носят полуквантитативный характер, являются устойчивыми по отношению к вариациям основных параметров.

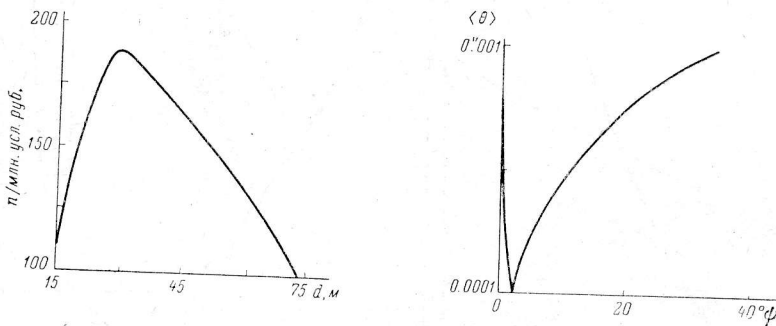


Рис. 11. Зависимость стоимости единицы информации от диаметра антенн.

Рис. 12. Зависимость разрешающей способности системы с предельным угловым разрешением $0^\circ.0001$ от угловых расстояний между источниками.

В частности, устойчивым является и основное заключение об оптимальности по стоимости при заданном разрешении системы, сформированной из антенн с диаметром $d=30 \div 25$ м. На рис. 13 приведена зависимость фазовой чувствительности системы (при $\lambda=5$ см) при заданной стоимости $S=100$ млн. усл. руб. в зависимости от диаметра ее элементов. Видно, что оптимум по фазовой чувствительности лежит в той же области размеров антенн, образующих систему.

6. Если применительно к задачам построения изображений радиоисточников с высоким угловым разрешением необходимость больших баз $\rho \geq L_2$ не вызывает сомнений, то в отношении координатных задач весьма распространена противоположная точка зрения. Действительно, для малых баз проблема фазовой привязки пунктов (во всяком случае, для сантиметрового диапазона длин волн) не стоит так остро, как в интерферометрии со сверхдлинными базами. Это связано с тем, что, во-первых, на малых базах имеется возможность прямой связи пунктов, а во-вторых, тропосферный бег на относительно небольших базах мал. Например, при $\rho \leq 50$ км и $\lambda=5$ см, $\sqrt{D_\Phi(\rho)} < \pi$. Таким образом, осуществление прямых фазовых измерений на малых базах не вызывает принципиальных трудностей. Измерение же фазы с точностью до градуса (до малых долей λ/ρ), казалось бы, можно реализовать с помощью дифференциальных наблюдений. Однако такая возможность практически нереализуема, ибо требует чрезвычайно высокой чувствительности системы по потоку i , как следствие, антенн с диаметрами, существенно большими предельных ($d=150$ м), даже в том идеальном случае, когда исследуемый и опорный источники наблюдаются под одинаковыми зенитными углами, а время накопления $T > L_1/v$ (рис. 14).

7. Таким образом, метод опорного объекта может быть успешно применен при создании фазостабильной радиоинтерферометрической сети с большими базами,

хотя и требует значительно больших усилий, нежели те, которые предполагались в работе [2]. Идея формирования фазостабильных систем из относительно малых элементов психологически воспринимается с некоторым трудом. Это связано с тем, что опыт наблюдений, проводимых в радиометрическом режиме, определил тенденцию на использование антенн с максимальными собирающими поверхностями. Однако по мере появления и успешной работы систем апертур-

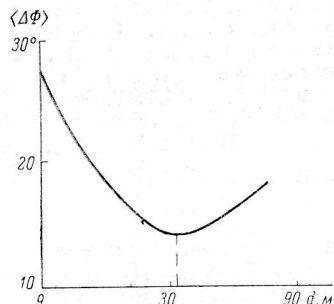


Рис. 13. Зависимость фазовой чувствительности системы от диаметра антенны при заданной стоимости системы $S=100$ млн. усл. руб.

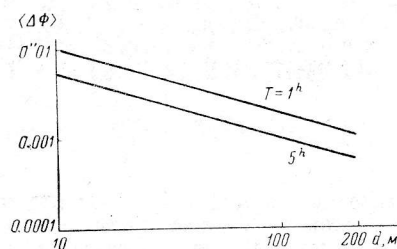


Рис. 14. Зависимость предельного углового разрешения $\langle \Delta \theta \rangle$ двухэлементного интерферометра с базой $\rho=50$ км от диаметра его антенн.

ного синтеза становится все более очевидным тот факт, что достаточно видеть источники в режиме сети и не обязательно (хотя и желательно) видеть их на отдельных базах.

Отметим, что формирование системы из малых элементов является оптимальным не только в экономическом, но и в организационном аспекте, ибо каждый элемент такой системы может играть сколько-нибудь заметную радиоастрономическую роль лишь при работе в режиме сети. Объективная необходимость в «кооперации по собирающей поверхности» может оказаться весьма существенным фактором для успешной работы системы, если учесть, что ее элементы разделены тысячами километров. Такая структура, как нам представляется, особенно естественна для системы «Полигам», где отдельные элементы объединяются в единую сеть с помощью геостационарного спутника связи [15].

Литература

1. Olthof H. The geostationary satellite as an aid to VLBI. — ESA Bulletin, 1978, N 16, p. 68.
2. Парийский Ю. Н., Стоцкий А. А. О возможности получения радиоизображений небесных тел с разрешением выше 10^{-2} сек дуги. — Изв. ГАО, 1972, № 188, с. 195—211.
3. Jennison R. G. A phase sensitive interferometer technique for the measurement of Fourier transformation. — MNRAS, 1958, 118, N 3, p. 276—284.
4. Vessot R. Frequency and Time Standards. «Method of Experimental Physica», v. 12, pt. C. Academic Press, N. Y., 1976, p. 198.
5. Алексеев В. А. Кандидатская диссертация. Горький, НИРФИ, 1970.
6. Стоцкий А. А. О флуктуационных характеристиках тропосферы Земли. — Изв. вузов, Радиофизика, 1973, 16, № 5, с. 80—809.
7. Дравских А. Ф., Финкельштейн А. М. О влиянии тропосферы при радиointерферометрических дифференциальных измерениях координат. — Астрон. ж., 1979, 56, (5), с. 1100—1104.
8. Moran J. M., Penfield H. NASA Report NAS 5-20975, 1976.
9. Winn F. B., Wu L. E., Resch G. M., Chao C. C., von Roos D. U. JPL Deep Space Network Progress Report 42-32, 1976.
10. Умарбаева Н. Д. Оценка вероятного числа внегалактических радиоисточников малых угловых размеров для радиоастрономии. — Астрон. ж., 1975, 53, № 5, 1132—1134.
11. Есепкина Н. А., Корольков Д. В., Парийский Ю. Н. Радиотелескопы и радиометры. М., «Наука», 1973. 415 с.
12. VLA Concept., vol. 1. NRAO, 1967.
13. Kellermann K. An intercontinental very long baseline array. VLBI Network Studies III. NRAO, May, 1972.

14. Broten N. W., Bridle A. H., Galt J. A., Gregory P. C., Legg T. H., Kronberg P. P., Shuter W. L., Costain C. H. VLBI Array proposal. CASCA Committee on Radio Astronomy, 1979.
15. Алексеев В. А., Брауде С. Я., Брумберг В. А., Буланже Ю. Д., Гатэлюк Э. Д., Гельфрейх Г. Б., Губанов В. С., Дравских А. Ф., Есепкина Н. А., Зверев Ю. К., Кардашев Н. С., Корольков Д. В., Котов Б. А., Котов Ю. А., Красинский Г. А., Матвеев Л. И., Мень А. В., Никонов В. А., Парийский Ю. Н., Парийский Н. Н., Погребенко С. В., Попов Е. И., Разин В. А., Саломонович А. Е., Слыш В. И., Смоленцев С. Г., Сороченко Р. Л., Станкевич К. С., Стоцкий А. А., Троицкий В. С., Умарбаева Н. Д., Финкельштейн А. М., Фридман П. А., Херсонский В. К., Царевский Г. С., Цейтлин В. А., Цымбал В. А., Яцкив Я. С. «ПОЛИГАМ». — Сообщ. САО, 1980, вып. 27—30.

Поступила в редакцию 12.01.81