

Министерство высшего и среднего специального образования
Р С Ф С Р

Горьковский ордена Трудового Красного Знамени
научно-исследовательский радиофизический институт (НИРФИ)

П р е п р и н т № 244

СВЕРХДИЛННОБАЗОВАЯ РАДИОИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ :
ОПРЕДЕЛЕНИЕ КООРДИНАТ ИСКУССТВЕННЫХ
КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ
(основы метода)

В.А.Алексеев
Э.Д.Гатялок
Б.Н.Дипатов

Горький 1 9 8 7

Алексеев В.А., Гатэляк Э.Д., Липатов Б.Н.

СВЕРХДЛИННОБАЗОВАЯ РАДИОИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ: ОПРЕДЕЛЕНИЕ КООРДИНАТ ИСКУССТВЕННЫХ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ (основы метода) // Препринт № 244. - Горький, НИРФИ. - 1987. - 35 с.

УДК 520.27+520.874

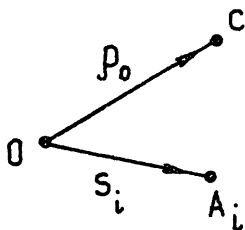
Рассматривается возможность применения методов радиоинтерферометрии со сверхдлинной базой (РСДБ) для решения задачи точного измерения координат искусственных космических объектов, находящихся на высотных и сильноэллиптических орбитах спутников Земли. Приведены основные требования к наземной и бортовой составляющим измерительного координатного комплекса. Рассмотрено несколько вариантов схем его функционирования и несколько вариантов построения апертуры наземной измерительной системы. Приведены оценки потенциальной точности координатных измерений.

I. В основе традиционной радиоинтерферометрии лежит измерение в пространственно разнесенных точках степени когерентности волновых полей, создаваемых излучающим радиосигналы источником. В общем случае выражение для комплексного коэффициента когерентности полей от точечного объекта, излучающего радиосигналы на длине волны λ , можно записать в виде

$$\mu = \langle \tilde{u}_1 \tilde{u}_2 \rangle \exp \left\{ j \left[\frac{2\pi}{\lambda} \Delta r_i(\rho_0, S_i) \right] \right\}, \quad (I)$$

где \tilde{u}_1 и \tilde{u}_2 - амплитуды полей сигналов на входах двух антенн радиоинтерферометра, $\Delta r_i(\rho_0, S_i)$ - пространственная разность хода сигналов от объекта до антенн интерферометра, ρ_0 - радиус-вектор излучающего объекта из одного из приемных пунктов интерферометра, который будем называть опорным (см. рис. I), S_i - вектор, соединяющий приемные пункты, или вектор базы интерферометра.

Методическую основу возможности применения радиоинтерферометрии для измерения пространственных координат искусственных объектов (ИКО) составляет зависимость фазы комплексного коэффициента когерентности (I) от вектора ρ_0 , характеризующего положение объекта в выбранной системе координат. Основным измеряемым параметром при этом является пространственная разность хода сигналов Δr_i . Из выражения (I) следует, что соотношение между искомой величиной Δr_i и фазой коэффициента когерентности даже при условии, что приемно-регистрирующая аппаратура не нарушает фазовых соотношений в сигналах



Р и с. I

имеющихся на входах антенн, оказывается при монохроматическом

(узкополосном) приеме неоднозначным, так как фазометрические системы дают возможность измерять только часть полной фазы $-\pi \leq \varphi_s \leq \pi$, и полная фаза $\varphi_{s,\lambda} = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta r$ выходного сигнала интерферометра может быть определена лишь сточностью до величины $2\pi n$ (n - целое число). Измеренной разности фаз соответствует семейство гиперболических поверхностей

$$\Delta r_n = \lambda \left(n + \frac{\varphi_s}{2\pi} \right), \quad (2)$$

поэтому измерительная задача включает в себя прежде всего разрешение неоднозначности для определения номера гиперболической поверхности и затем - определение точки положения наблюдаемого объекта на данной поверхности. Для разрешения возникающей неоднозначности необходимо расширить полосу пространственных частот, занимаемую диаграммой направленности интерферометра. Этого можно достичь путем установки дополнительных промежуточных антенн между основными приемными пунктами при монохроматическом приеме, или применением широкополосного (многочастотного) приема с измерением относительного группового запаздывания сигналов $\tau = \frac{1}{c} \Delta r$ в системе двухэлементного радиоинтерферометра, с тем чтобы сформировать диаграмму направленности, лепестки которой можно было бы селективировать по амплитуде (в идеале - однолепестковую диаграмму направленности). Второй из указанных способов разрешения неоднозначности является более экономичным и, по ряду причин, более предпочтительным при координатных измерениях.

Если прием сигналов производится в полосе частот $\Delta \omega$ со средней несущей частотой $\omega_0 = \frac{2\pi}{\lambda} c$, то получаемый на выходе интерферометра через вычисление взаимно корреляционной функции поступающих сигналов коэффициент когерентности полей пропорционален

$$\mu \sim \frac{\sin\left(\frac{\Delta \omega}{2c} \Delta r\right)}{\frac{\Delta \omega}{2c} \Delta r} \exp\left\{j \left[\frac{\omega_0}{c} \Delta r\right]\right\}, \quad (3)$$

то есть имеет практически однолепестковую огибающую с шириной главного лепестка

$$\Delta \tau = \Delta \left(\frac{\Delta r}{c} \right) \approx \frac{2\pi}{\Delta \omega}. \quad (4)$$

Широкополосный прием сигналов эквивалентен наличию в составе интерферометра сплошной антенны с шириной диаграммы направленности $\sim 2\pi c / \Delta \omega S$, где S - длина базы интерферометра. Делая полосу

частот прием достаточно широкой, можно, в принципе, разрешить неоднозначность фазовых измерений, используя селектирующее действие огибающей, и формально получить разрешающую способность по углу $\lesssim \frac{\lambda}{S}$.

2. В радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ) метод фазовых измерений координат источников не применяется по ряду причин, основные из которых следующие:

- наличие автономных стандартов частоты в приемных пунктах интерферометра, от которых формируются сигналы местных гетеродинов, делает неопределенным и постоянно изменяющимся со временем фазовый сдвиг между информативными сигналами на выходах разных приемных трактов интерферометра; этой неопределенности можно, в принципе, избежать, применяя известные методы фазировки (например, метод обмена информацией о фазе [1,2]), однако это технически трудно реализуемо;

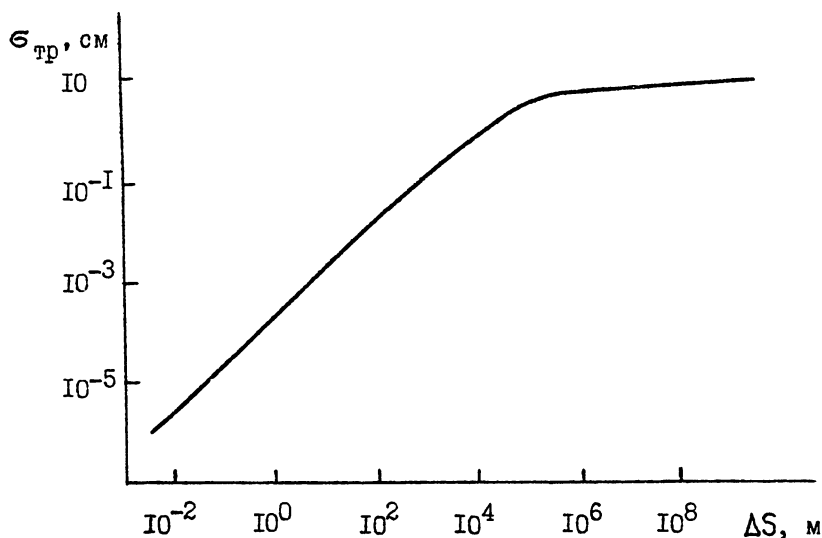
- потенциальную точность интерферометрических координатных измерений ограничивает, в основном, неопределенность времени распространения сигналов в атмосфере Земли, которая соответствует (при длинах базовой линии ≥ 200 км) ошибке измерения пространственной разности хода $\sim 15 - 20$ см; в этих условиях проведение фазовых измерений, обеспечивающих аппаратную погрешность отсчета пространственной задержки ~ 1 мм, нецелесообразно и для достижения точности измерения Δr , близкой к потенциальной, достаточно использовать корреляционную огибающую при ширине полосы частот приема ≈ 50 МГц;

- при проведении координатных измерений на сравнительно низких несущих частотах ($\lesssim 1 - 2$ ГГц) существенную роль начинают играть дисперсионные свойства ионосферы Земли, что приводит к различию (в значительной степени неопределенному - из-за влияния неоднородностей среды) фазовой и групповой задержек радиосигналов в ионосфере, то есть к неконтролируемому сдвигу высокочастотного заполнения диаграммы направленности интерферометра (3) относительно ее огибающей; неоднозначность фазовых измерений в таких условиях не может быть корректно разрешена.

Таким образом, в РСДБ определение пространственной разности хода радиосигналов производится через измерение групповой задержки между ними по корреляционной огибающей выходного сигнала. Фазовые же измерения сохраняют свое значение только в задаче определения относительного положения двух (или нескольких) близко расположенных между собой объектов. Искомой величиной при этом является разностная пространственная задержка сигналов от двух источников радиоизлучения. Результаты таких дифференциальных измерений полностью сво-

бодны от влияния неопределенности фаз задающих стандартов частоты в приемных пунктах; в значительной степени ослабляется влияние неоднородностей среды на трассах распространения, поскольку сигналы от источников радиоизлучения проходят по близким траекториям. В целом, точность дифференциальных координатных измерений может быть получена примерно на порядок выше точности измерения абсолютных координат [3].

3. Потенциальную точность интерферометрических координатных измерений ограничивает, в основном, влияние неоднородностей тропосферы на трассах распространения сигналов. На рис. 2 приведена структурная функция флуктуаций электрической толщи тропосферы в зависимости от расстояния между точками на земной поверхности [4].



Р и с . 2

Из графика следует, что при длине базы интерферометра ≈ 100 – 150 км среднеквадратичная величина флуктуаций электрической толщи тропосферы растет примерно пропорционально увеличению длины базовой линии с коэффициентом пропорциональности $\sim 10^{-6}$. Это означает, что точность угловых измерений при таких длинах базовой линии принципи-

ально не может быть сделана выше чем \bar{I} в однократном измерении, При длинах базовой линии, превышающих 200 км, среднеквадратичная величина флуктуаций электрической толщи тропосферы стабилизируется на уровне 7 - 10 см в зенитном направлении и потенциальная точность угловых измерений неограниченно растет с увеличением длины базы интерферометра. Именно этим объясняется тот факт, что системы со сверхдлинной базой имеют в настоящее время рекордную точность измерения угловых координат удаленных радиосточников: $\approx 0",01 \div 0",03$.

4. Процедура преобразования и обработки информативных сигналов от источника космического радиоизлучения в трактах интерферометра заключается в следующем. Пусть источник излучает сигнал $S(t)$ в некоторый момент времени t . Этот сигнал достигнет приемных пунктов интерферометра через интервалы времени $\tau_1 = cr_1$, $\tau_2 = cr_2$, где r_1 и r_2 - электрические длины трассы распространения, c - скорость света в вакууме. Принятые сигналы $S(t - \tau_1)$ и $S(t - \tau_2)$ переносятся на видеочастоту путем смещения с высокостабильными гетеродинами сигналами, сформированными от местных атомных стандартов частоты-времени, усиливаются и, по принятой в РСДБ методике, либо записываются в цифровом виде вместе с метками времени от тех же стандартов на магнитные ленты, либо передаются в пункт обработки по широкополосным линиям связи также в цифровом виде и при наличии синхросигналов от стандартов частоты-времени, что позволяет избавиться от влияния нестабильности электрических длин линий. В пункте обработки интерферометрической информации производится вычисление модуля комплексной двумерной корреляционной функции поступающих сигналов в координатах "временная задержка" τ_0 - "частота интерференции" Ω_0 :

$$V(\tau_0, \Omega_0) = \left| \frac{1}{T - \tau_0} \int_t^{t+\tau} S_1^*(t - \tau_1) S_2^*(t - \tau_2 - \tau_0) e^{-j\Omega_0 t} dt \right|, \quad (5)$$

где S_1^* и S_2^* - принятые в пункте обработки информативные сигналы; τ_0 и Ω_0 - вводимые при обработке временной и частотный сдвиги между сигналами, компенсирующие соответственно относительную групповую задержку сигналов, вызванную наличием пространственной разности хода $\Delta r = r_1 - r_2$, и относительный доплеровский сдвиг частот, обусловленный перемещением излучающего объекта относительно приемных пунктов интерферометра, T - время когерентного накопления энергии сигнала.

Эта корреляционная функция, являющаяся точным аналогом известной в радиолокации "функции неопределенности", и представляет собой выходной сигнал РСДБ. Зависимость функции V от переменной τ_0 пропорцио-

нальна модулю отгибающей коэффициента когерентности полей на входах антенн интерферометра. Значения τ_0^{\max} и Ω_0^{\max} , максимизирующие выходной сигнал интерферометра, являются максимально правдоподобными оценками величин групповой задержки между сигналами $\tau = \frac{c \Delta r}{c}$ и относительно доплеровского сдвига их несущих частот $\Delta \Omega_g = \frac{\omega_0}{c} \left(\frac{dr_1}{dt} - \frac{dr_2}{dt} \right)$ [5,6]. Они находятся путем решения системы уравнений правдоподобия:

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial \tau_0} &= 0, \\ \frac{\partial V}{\partial \Omega_0} &= 0. \end{aligned} \quad (6)$$

Ширина главного максимума аппаратной функции интерферометра по координате τ_0 равна $\Delta \tau = \frac{2\pi}{\Delta \omega}$, а по координате Ω_0 $\Delta \Omega = \frac{2\pi}{T}$. Если информативные сигналы на выходах приемных трактов имеют прямоугольную полосу частот, то аппаратная функция интерферометра имеет простой вид:

$$W(\tau_0, \Omega_0) \approx \left| \frac{\sin\left(\frac{\Delta \omega}{2} \tau_0\right)}{\frac{\Delta \omega}{2} \tau_0} \frac{\sin\left(\frac{T}{2} \Omega_0\right)}{\frac{T}{2} \Omega_0} \right|. \quad (7)$$

Аппаратурные погрешности отсчета групповой задержки и частоты интерференции, обусловленные влиянием аддитивного шума, приближенно равны

$$\sigma_{\tau} \approx \frac{2\pi}{\Delta \omega} \frac{\sigma_{\omega}}{\sigma_c}, \quad \sigma_{\Omega} \approx \frac{2\pi}{T} \frac{\sigma_{\omega}}{\sigma_c}, \quad (8)$$

где σ_{ω}^2 - дисперсия шума на выходе интерферометра, σ_c^2 - взаимная коррелированная мощность двух информативных сигналов.

5. Пространственная разность хода сигналов Δr в общем случае является функцией времени вследствие перемещения ИКО относительно базы интерферометра за счет собственного орбитального движения, суточного вращения Земли, а также - возможного вращения ИКО вокруг своего центра масс, не совпадающего с местом расположения фазового центра его передающей антенны. Это приводит к двум связанным эффектам: во-первых, к появлению, как указывалось, относительного доплеровского сдвига несущих частот принимаемых сигналов, в общем случае - зависящего от времени, и, во-вторых, - к зависимости от t группового времени запаздывания τ . При характерных для ИСЗ скоростях движения зависимость τ и Ω_g от времени внутри интервала когерентного накопления T (длительностью обычно порядка 100 с в РСДБ) может приводить к потере накапливаемой энергии сигнала за счет "размазывания" ее по

плоскости $\{\tau_0; \Omega_0\}$ в выходном сигнале (5) и, соответственно, к большей аппаратной погрешности отсчета τ или вообще - к невозможности проведения измерений. Поэтому алгоритм обработки информативных сигналов непосредственно в том виде, в каком он дается выражением (5), может быть использован при ограниченных временах накопления и полосах частот сигналов либо при наблюдении относительно неподвижных объектов, а именно, при

$$\frac{T}{c} \frac{d\Delta r}{dt} < \frac{\pi}{\Delta\omega}, \quad \frac{\omega_0 T}{c} \frac{d^2\Delta r}{dt^2} < \frac{\pi}{T}. \quad (9)$$

Эти соотношения означают, что изменение τ и Ω_0 за время T не превышают полуширины главного максимума аппаратной функции интерферометра по координатам τ_0 и Ω_0 . Например, при $T = 100$ с $\Delta\omega/2\pi = 10$ МГц и $\omega_0/2\pi = 5$ ГГц из (9) получим, что скорость изменения пространственной разности хода не должна превышать 15 см/с, а ускорение - $0,3 \cdot 10^{-3}$ см/с². В традиционной радиоинтерферометрии при наблюдении естественных источников космического радиоизлучения, где этот эффект, связанный с суточным вращением Земли, оказывается также существенным, к вводимым при обработке временному и частотному сдвигам τ_0 и Ω_0 добавляются текущие корректирующие поправки, рассчитанные по априорно приближенно известным параметрам вектора базы интерферометра и координатам источника. Это позволяет с достаточной степенью точности отслеживать изменение τ и Ω_0 в течение единичного сеанса измерения. Этот метод может быть применен также и при наблюдении ИКО для учета влияния суммарного эффекта орбитального движения объекта и суточного вращения Земли в течение времени T . Параметры орбиты ИКО должны быть при этом приближенно известны с точностью, которая обеспечивала бы выполнение следующих условий, полученных из соотношений (9);

$$\Delta \left(\frac{d\Delta r}{dt} \right) < \frac{\pi c}{\Delta\omega T}, \quad \Delta \left(\frac{d^2\Delta r}{dt^2} \right) < \frac{\pi c}{\omega_0 T^2}, \quad (10)$$

где $\Delta \left(\frac{d\Delta r}{dt} \right)$ и $\Delta \left(\frac{d^2\Delta r}{dt^2} \right)$ - отличие вычисленных по априорным данным скорости и ускорения изменения пространственной разности хода от их истинных значений. При наблюдении ИКО на высоких орбитах ($H \approx 10$ тыс. км) с малым эксцентриситетом эти условия могут быть в большинстве случаев легко выполнены, поскольку угловые скорости и ускорения таких объектов относительно базы интерферометра не велики, не велики также проекции векторов их скорости и ускорения на радиальное направление. При наблюдении ИКО на низких орбитах и некоторых участках сильноэвл-

липтических орбит выполнение условий (10) будет связано с определенными трудностями. Априорно неопределенным будет также являться изменение Δr за счет возможного вращения ИКО относительно собственного центра масс. Такое вращение будет приводить к периодическим колебаниям величины пространственной разности хода, вида $\Delta r = \Delta r_0 + A \sin(\Omega_1 t + \varphi)$. Оно будет искажать отклик интерферометра, если полный размах изменения Δr и её производной за время T будет превышать полуширину главного максимума выходного сигнала (5) по осям τ_0 и Ω_0 :

$$\left. \begin{aligned}
 A \left\{ \sin(\Omega_1 t + \varphi) - \sin[\Omega_1(t+T) + \varphi] \right\} > \frac{\pi c}{\Delta \omega} \\
 A \Omega_1 \left\{ \cos(\Omega_1 t + \varphi) - \cos[\Omega_1(t+T) + \varphi] \right\} > \frac{\pi c}{T \omega_0}
 \end{aligned} \right\} \text{при } T < \frac{2\pi}{\Omega_1}, \quad (11)$$

$$\left. \begin{aligned}
 2A > \pi c / \Delta \omega \\
 2A \Omega_1 > \pi c / T \omega_0
 \end{aligned} \right\} \text{при } T > \frac{2\pi}{\Omega_1}.$$

Единственным выходом в описанной ситуации является введение параметров, характеризующих изменение Δr , в число неизвестных параметров, определяемых совместно с τ_0^{\max} и Ω_0^{\max} , на основе модельного представления зависимости Δr от времени. Например, в простой форме модель может быть задана в виде некоторого числа членов степенного ряда, отвечающих за орбитальное движение ИКО в течение времени T , и гармонического члена, отвечающего за вращение объекта, например:

$$\Delta r^*(t) = \Delta r_0 + \alpha t + \beta t^2 + \gamma t^3 + A \sin(\Omega_1 t + \varphi), \quad (12)$$

где Δr_0 имеет смысл разности расстояний от центра вращения объекта до антенн интерферометра в начальный момент единичного сеанса измерений.

Соответственно этому алгоритм обработки информативных сигналов с выходов приемных трактов РСДБ принимает вид

$$V^*(\Delta r_0; \alpha; \beta; \gamma; A; \Omega_1; \varphi) = \left| \frac{1}{T} \int_t^{t+T} s_1^*(t) s_2^*(t - \tau_0(t)) e^{-j\Omega_0(t)t} dt \right|, \quad (13)$$

где $\tau_0 = \frac{1}{c} \Delta r^*(t)$, $\Omega_0(t) = \frac{\omega_0}{c} \frac{d\Delta r^*(t)}{dt}$. Значения неизвестных параметров Δr_0^{\max} , α^{\max} , β^{\max} , γ^{\max} , A^{\max} , Ω_1^{\max} и φ^{\max} , максимизирующие выходной сигнал интерферометра (13), являются искомыми величинами. Выбор той или иной модели зависимости Δr от времени определяется конкретной ситуацией.

Отметим, что если интенсивность излучаемых ИКО радиосигналов достаточно велика, так что необходимое превышение сигнала над шумом на

выходе интерферометра может быть обеспечено при малом времени когерентного накопления T , то ограничения, накладываемые соотношениями (9), (10) и (11), будут значительно ослаблены. При этом уменьшение T не повлияет на точность измерения основного параметра – временной задержки, поскольку здесь важна только широкополосность излучаемых ИКО сигналов, но точность измерения относительного доплеровского сдвига частот существенно упадет, как это следует из соотношений (8).

6. Основное требование, предъявляемое системами РСДБ к структуре излучаемых ИКО радиосигналов, – их широкополосность (≥ 50 МГц). В простейшем случае это может быть одиночный короткий импульс или периодическая последовательность импульсов (с достаточно большим периодом следования – чтобы избежать возможной неоднозначности измерений). Может быть применено излучение нескольких синусоидальных сигналов с частотами, определенным образом рассредоточенными внутри полосы частот $\Delta\omega$. Может быть также использована псевдослучайная последовательность импульсов или просто излучаться широкополосный сигнал от генератора шума.

Если структура излучаемого ИКО сигнала априорно известна то, в принципе, отпадает необходимость в широкополосных линиях связи для передачи информативных сигналов в пункт обработки РСДБ или в записи сигналов на магнитные ленты. В этом случае в каждом приемном пункте целесообразно производить согласованный прием радиосигналов вида (5), где в качестве второго сигнала $S_2(t)$ служит известная копия излучаемого ИКО сигнала, задаваемая в масштабе местной шкалы времени приемного пункта. Таким образом, можно определить момент времени прихода радиосигнала t_i^* (например, момент появления переднего фронта сигнала и т.п.) в каждый приемный пункт по шкале местного стандарта времени-частоты. Информация о временах прихода сигналов на каждый приемный пункт может быть теперь передана в пункт обработки по телеграфным каналам. Искомая групповая задержка τ , очевидно, есть $\tau = t_1^* - t_2^*$, если предполагать, что шкалы времени в приемных пунктах идентичны. Функционально такая схема адекватна описанной выше традиционной схеме РСДБ.

7. Непременным условием работы радиоинтерферометрической системы является одновременное наблюдение сигнала от ИКО во всех наземных приемных пунктах, работающих в составе РСДБ. Поскольку характерные размеры апертуры РСДБ составляют несколько тысяч километров, то есть порядка расстояния до ИСЗ на сравнительно низких орбитах или некоторых участках сильноэллиптических орбит, то бортовая передающая антен-

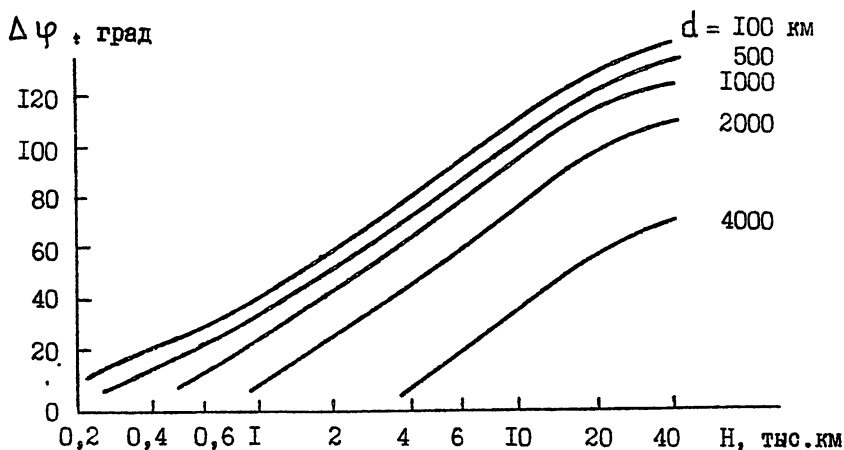
на должна быть практически ненаправленной. Если принять за критерий уверенного приема отношение энергии полезного сигнала к мощности шума ~ 20 дБ на выходе согласованного приемника, то минимально необходимую мощность, излучаемую в полусферу бортовым передатчиком, можно найти из следующего соотношения:

$$P_{п/с} \geq 10^2 \frac{4\pi r^2 k T_{ш}}{T A_{эфф}}, \quad (14)$$

где r - дальность до ИКО, k - постоянная Больцмана, $T_{ш}$ - шумовая температура системы, $A_{эфф}$ - эффективная площадь приемной антенны, T - длительность информативного сигнала.

Если $r \approx 100$ тыс. км, $T_{ш} \approx 100$ К, $A_{эфф} \approx 200$ м² и $T \approx 10^{-3}$ с, то получим $P_{п/с} \approx 0,1$ Вт.

На рис. 3 показаны зависимости угловых размеров областей совместной видимости ИКО из приемных пунктов, расположенных на поверхности сферической Земли, при различных размерах апертуры РСДБ, характеризующейся эффективным радиусом d . При этом предполагается, что ИКО наблюдается в каждом приемном пункте при углах места, больших 10° ; $\Delta\varphi$ - диаметр геоцентрического телесного угла, центр которого проходит на поверхности Земли через геометрический центр апертуры РСДБ.



Р и с. 3

Из рис.3, в частности, следует, что ИКО на высотах до 3 тыс. км. над поверхностью Земли вообще не наблюдается комплексом, имеющим радиус 12

апертуры 4 тыс.км, а на высотах до 1 тыс.км - имеющим $d \approx 2$ тыс.км. Поэтому стремление увеличить угловую разрешающую способность измерений за счет увеличения протяженности базовых линий встречает серьезные препятствия. И если есть необходимость иметь очень протяженные базовые линии для увеличения точности определения положения высотных ИКО, то для обеспечения возможности наблюдения ИКО на небольших высотах, конфигурация апертуры должна заключать в себе и достаточное число базовых линий меньшей длины ($S \lesssim 1000$ км). Если количество приемных пунктов ограничено 3 - 5, то для наблюдения ИКО на высотах от 1,5 до 100 тыс.км, оптимальной будет апертура с $d \approx 1000$ тыс.км. При этом в указанной области высот углы одновременной видимости ИКО будут менее 40° , как это следует из рис.3.

8. Радиointерферометр традиционно считается угломерным инструментом. Однако, если длина базы интерферометра и расстояние до излучаемого объекта - величина одного порядка, так что фронт волны приходящего излучения явля тся в плоскости апертуры интерферометра существенно сферическим, появляется возможность измерения всех трех пространственных координат объекта. При этом необходимо заметить, что чувствительность измерений дальности до объекта резко падает в случае, если $\rho > (2 + 3)S$ (ρ - дальность до ИКО) с коэффициентом пропорциональности ρ^2/S^2 . Дополнение радиointерферометрии прямым измерением дальности позволяет достигнуть высокой точности измерения всех 3 пространственных координат объекта, мало зависящей от взаимного расположения приемных пунктов и ИКО.

Информацию о координатах объекта, а также о векторе его скорости содержит еще один измеряемый параметр - частота интерференции, которая, как указывалось выше, пропорциональна скорости изменения пространственной разности хода $d(\Delta r)/dt$ и представляет собой относительный доплеровский сдвиг частот между принимаемыми в двух приемных пунктах РСДБ сигналами от источника излучения, обусловленный суточным вращением Земли и перемещением ИКО по орбите. Этот параметр может быть использован для координатных измерений умеренной точности (эксперименты по определению координат аппаратов "Вега", НИРФИ-ИКИ, 1985, 1986 гг.), но область применения его ограничена.

Ниже описано несколько возможных вариантов построения и функционирования длиннбазового координатного комплекса.

Вариант А. Разностно-дальномерный измерительный комплекс. Несколько приемных пунктов на поверхности Земли ведут согласованный прием импульсных широкополосных сигналов от ИКО. Оперативность измерений обеспечивается обработкой сигналов в реальном времени с целью

определения моментов времени t_i прихода импульсов по шкале местного стандарта времени-частоты каждого i -го приемного пункта.

Пусть в точке O (см.рис.1) находится опорный приемный пункт интерферометра, в точке A_i - i -й периферийный пункт, ИКО находится в точке C . Пространственная разность хода сигналов $\Delta r_i = c(t_0 - t_i)$, являющаяся измеряемой величиной, связана с вектором базы \vec{s}_i и радиус-вектором ИКО $\vec{\rho}_0$ соотношением

$$\Delta r_i = |\vec{\rho}_0| - |\vec{\rho}_0 - \vec{s}_i| = (\vec{\rho}_0 \cdot \vec{\rho}_0)^{1/2} - [(\vec{\rho}_0 - \vec{s}_i) \cdot (\vec{\rho}_0 - \vec{s}_i)]^{1/2}. \quad (15)$$

Положение ИКО полностью определяется вектором $\vec{\rho}_0$, компоненты которого и являются искомыми координатами источника. Параметры вектора базы считаются известными, а рассинхронизация шкал времени в приемных пунктах - скомпенсирована в процессе калибровки системы. Если предварительно известно приближенное положение ИКО, то вместо уравнения (15) можно использовать уравнение для поправок координат, полученное из (15)

$$(\vec{l}_{\rho_0} - \vec{l}_{\rho_0 - s_i}) d\vec{\rho}_0 = d(\Delta r_i) - (\vec{l}_{\rho_0 - s_i} \cdot d\vec{s}_i), \quad (16)$$

здесь \vec{l}_{ρ_0} и $\vec{l}_{\rho_0 - s_i}$ - единичные вектора в направлении на ИКО из обоих приемных пунктов интерферометра, $d\vec{\rho}_0$ - поправка к радиус-вектору ИКО $\vec{\rho}_0$, $d(\Delta r)$ - различие между измеренной пространственной разностью хода и - вычисленной по априорно известным координатам ИКО, $d\vec{s}_i$ - имеет смысл истинного значения вектора базы от его значения, полученного в результате калибровки интерферометра, то есть представляет собой погрешность калибровки.

Задача однозначного определения всех 3 "мгновенных" пространственных координат ИКО решается измерительным комплексом, имеющим не менее четырех наземных приемных пунктов. Это обеспечивает получение трех независимых отсчетов пространственной разности хода и позволяет составить систему из трех уравнений вида (15) или (16), решение которой дает сразу все пространственные координаты ИКО в момент времени послышки им сигнала.

Вариант Б. Длиннобазовый дальномерный координатный комплекс. Несколько приемных пунктов на земной поверхности ведут согласованный прием ретранслируемых ИКО широкополосных сигналов наземной передающей станции. Информация о моментах времени прихода (и - излучения - с передающей станции) сигналов сообщается в пункт обработки, где вычисляются величины временных сдвигов между моментом излучения сигнала с Земли и моментом приема ретранслированного ИКО сигнала для каждого

i -го приемного пункта. Шкалы времени во всех наземных пунктах, также как и в предыдущем варианте, должны быть строго согласованы между собой. Такая координатная измерительная система полностью эквивалентна интерферометру при измерении угловых координат ИКО и радиодальномеру при измерении дальности.

Для этой схемы функционирования координатного комплекса можно получить следующие методические соотношения, аналогичные соотношениям (15) и (16), если считать, что в точке 0 на рис. 1 расположена излучающая станция, а в точке A_i - приемный пункт:

$$\Delta r_i = |\vec{p}_i| + |\vec{p}_0 - \vec{s}_i| = (\vec{p}_0 \cdot \vec{p}_0)^{1/2} + [(\vec{p}_0 - \vec{s}_i)(\vec{p}_0 - \vec{s}_i)]^{1/2}, \quad (17)$$

$$(\vec{l}_{p_0} + \vec{l}_{p_0 - s_i}) dp_0 = d(\Delta r_i) + (\vec{l}_{p_0 - s_i} d\vec{s}_i). \quad (18)$$

В этом случае задача однозначного определения всех пространственных координат ИКО решается комплексом, имеющим минимум три наземных приемных пункта и один передающий пункт, местоположение которого, в принципе, может совпадать с местоположением одного из приемных пунктов. Это, как в предыдущем случае, обеспечивает получение трех независимых отсчетов измеряемой величины и позволяет составить разрешимую систему из трех уравнений вида (17) или (18).

Вариант В. Разновидность предыдущего варианта. Отличие состоит в том, что во всех трех наземных пунктах установлены радиодальномеры, работающие автономно. Преимущество этого варианта заключается в том, что здесь нет необходимости в высокоточной синхронизации шкал времени в наземных пунктах. Требование точного знания векторов базовых линий сохраняется. Формальные методические соотношения для данного варианта с помощью линейного преобразования сводятся к соотношениям (17) и (18).

Вариант Г. Длиннобазовый доплеровский измерительный комплекс. Несколько приемных пунктов на земной поверхности ведут прием узкополосных сигналов от ИКО и, после преобразования в низкочастотную область, ретранслируют их в пункт обработки вместе с опорными сигналами от местных стандартов времени-частоты, позволяющими исключить фазовые искажения в линиях связи. В пункте обработки определяются относительные частотные сдвиги между принятыми в разных пунктах информативными сигналами по алгоритму (5) или (13). Может быть также применено непосредственное измерение частоты входящих от ИКО сигналов автономно в каждом приемном пункте по шкалам местных стандартов частоты-времени без передачи информативных сигналов по линиям связи. Однако в

этом случае существенную роль играет фазовая нестабильность бортового стандарта, в полной мере влияющая на результаты измерений.

Длительность времени когерентного накопления энергии сигналов в данном варианте определяет, согласно соотношению (8), аппаратурную погрешность измерений и должна быть не менее 100-200 с, поэтому структура системы обработки должна в полной мере учитывать условия, накладываемые ограничениями (10).

Формальная связь между измеряемой на i -й базовой линии величиной относительного доплеровского сдвига $F_{u_i} = \Omega_{\dot{p}_0} / 2\pi$ и параметрами, характеризующими координаты ИКО и вектор его скорости, имеет следующий вид:

$$F_{u_i} = \frac{f_0}{c} \frac{d(\Delta r_i)}{dt} = \frac{f_0}{c} \left[V_{p_0} (1 - \vec{l}_{p_0} \cdot \vec{l}_{p_0} \cdot \vec{s}_i) + \frac{p_0}{|\vec{p}_0 - \vec{s}_i|} \vec{l}_{p_0} (\vec{s}_i \times \vec{\omega}_{p_0}) \right] \quad (19)$$

где f_0 - несущая частота излучаемого ИКО сигнала, $V_{p_0} = dp_0/dt$ - радиальная скорость ИКО относительно опорного приемного пункта, $\vec{\omega}_{p_0}$ - вектор угловой скорости перемещения ИКО относительно опорного пункта.

Предполагается, что параметры векторов базовых линий, а также разность номиналов частот стандартов в приемных пунктах точно известны. В правую часть приведенного соотношения входят все шесть параметров, характеризующих мгновенную траекторию ИКО (три координаты и три составляющие скорости), однако, раздельное однозначное определение их при однократном измерении невозможно при любом количестве приемных пунктов. Существенная потеря информативности частотных измерений по сравнению с предыдущими вариантами обусловлена зависимостью правой части соотношения (19) лишь от проекций базовых линий на плоскость, перпендикулярную вектору $\vec{\omega}_{p_0}$. Апертура комплекса оказывается фактически "плоской" и параллельна видимой траектории ИКО. Однократное измерение частоты интерференции E_{u_i} на нескольких базовых линиях позволяет найти лишь комбинацию неизвестных параметров. Для решения координатной задачи в таких условиях необходимо привлечение моделей траектории ИКО (как это было сделано в упомянутых выше экспериментах НИРФИ-ИКИ) и общий период времени наблюдения ИКО должен быть порядка величины $2\pi/\omega_{p_0}$ (например, для ИСЗ на невысоких орбитах - порядка периода его обращения, для межпланетных ИКО - порядка длительности суток).

Хороший результат может дать дополнение предыдущих вариантов построения координатного комплекса частотными измерениями по описанной здесь схеме с использованием узкополосных информативных сигналов. В частности это позволит при однократном измерении дополнительно к

координатам ИКО определить вектор угловой скорости $\vec{\omega}_p$, а при расстоянии до ИКО, сравнимом с размером апертуры, все составляющие вектора скорости.

9. Мы провели анализ методических ошибок для основных схем построения координатного комплекса - вариантов А, Б и В. Точность определения координат ИКО полностью характеризуется корреляционной матрицей В, которая в рассматриваемых вариантах определяется корреляционной матрицей В полных ошибок измеряемых исходных параметров Δr_i^* и матрицей коэффициентов условных уравнений (I6) или (I8) P

$$B = P^{-1} B_{ii} (P^{-1})^T, \quad (20)$$

где

$$P = \left\{ \begin{array}{ccc} (\vec{l}_{p_0} \pm \vec{l}_{p_0-s_i})_x & (\vec{l}_{p_0} \pm \vec{l}_{p_0-s_i})_y & (\vec{l}_{p_0} \pm \vec{l}_{p_0-s_i})_z \\ \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots \end{array} \right\}$$

(i = 1, 2, 3)

- в декартовой прямоугольной системе координат. Знаки "-" в последнем выражении относятся к варианту А измерительного комплекса, а знаки "+" - к варианту Б (или В).

Если принять предположение, что полные погрешности измеряемых исходных параметров независимы между собой в разных приемных пунктах, то в корреляционной матрице B_{ii} отличными от нуля будут только элементы на главной диагонали, представляющие собой дисперсии полных ошибок исходных параметров $\sigma_{\Delta r_i^*}^2$, формальные выражения для которых можно получить, возводя в квадрат и усредняя по ансамблю правые части уравнений (I6) и (I8), считая, что эти соотношения описывают связь между погрешностями. Если считать, что погрешности калибровки (задания) каждого вектора базы \vec{s}_i координатного комплекса одинаковы по всем трем декартовым проекциям и независимы друг от друга, то из (I6) и (I8) можно получить одно и то же выражение:

$$\sigma_{\Delta r_i^*}^2 = \sigma_{\Delta r_i}^2 + \sigma_{S_i}^2, \quad (21)$$

где $\sigma_{S_i}^2$ - дисперсия ошибки задания каждой декартовой проекции векторов базовых линий, $\sigma_{\Delta r_i}^2$ - дисперсия ошибки измерения пространственной задержки в каждом приемном пункте; эта величина обусловлена рядом независимых факторов. Для вариантов А и Б справедливо

$$\sigma_{\Delta r_i}^2 = \sigma_{\Delta r_i \text{ ант}}^2 + \sigma_{\text{Тр}_i}^2 + \sigma_{\text{ион}_i}^2 + c^2 \sigma_{\Delta t_i}^2, \quad (22)$$

где $\sigma_{\Delta r_i, \text{анн}}$ - аппаратная ошибка отсчета пространственной задержки, включая флуктуационную ошибку, даваемую выражением (8), и ошибку учета задержек сигналов в приемном пункте, $\sigma_{\text{тр}}$ и $\sigma_{\text{ион}_i}$ - ошибки, связанные с неучтенным влиянием тропосферы и ионосферы на электрические длины трасс распространения сигналов, $\sigma_{\Delta t_i}$ - ошибка синхронизации шкалы времени в i -м приемном пункте относительно шкалы времени опорного пункта. Последняя составляющая ошибки отсутствует, как указывалось в варианте В:

$$\sigma_{\Delta r_i}^2 = \sigma_{\Delta r_i, \text{анн}}^2 + \sigma_{\text{тр}}^2 + \sigma_{\text{ион}_i}^2. \quad (23)$$

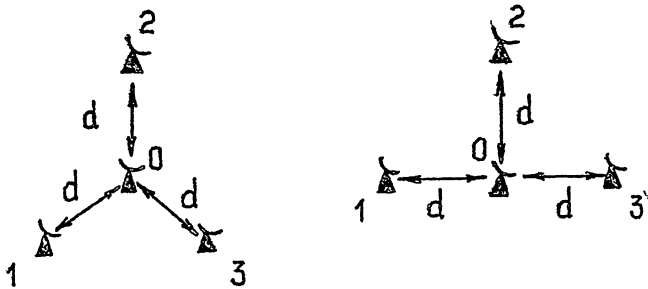
10. Мы прибегли к численному анализу ошибок, возникающих при работе координатного комплекса, в рамках модельного представления процедуры измерений. Вычислялись весовые коэффициенты K_{p_i} , связывающие дисперсии ошибок измеряемых параметров $\sigma_{\Delta r_i}^2$ с дисперсиями соответствующих погрешностей определения компонент вектора \vec{p}_0 : $\sigma_{p_i}^2 = \sigma_{\Delta r_i}^2 K_{p_i}^2$ в предположении равенности измерения пространственных задержек в каждом приемном пункте:

$$K_{p_i} = \left[(P^T P)^{-1} \right]_{i=j}^{1/2}, \quad (24)$$

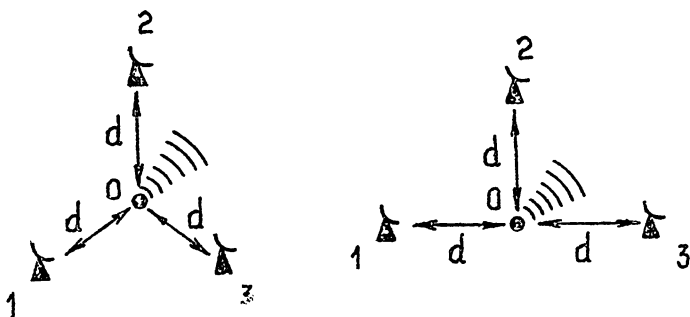
иными словами K_{p_i} есть квадратные корни соответствующих диагональных элементов матрицы $(P^T P)^{-1}$.

Предполагалось, что наземные пункты координатного комплекса расположены на поверхности сферической Земли в различных конфигурациях, показанных на рис. 4 (вариант А) и рис. 5 (вариант В или аналогичный ему вариант В). Каждая конфигурация располагалась внутри окружности радиуса d ; величина d в разных вариантах варьировалась в пределах от 100 до 4000 км. Координаты ИКО задавались в геоцентрической системе координат в сферических координатах H , θ и λ , где H - высота орбиты ИКО над Землей, θ - широта, отсчитываемая от плоскости XU , где ось X направлена из центра Земли в сторону геометрического центра апертуры, ось Z - перпендикулярно к "северу", ось Y - перпендикулярно оси X - к "востоку"; λ - долгота, отсчитываемая от плоскости X в положительном направлении - к "востоку".

Вычисляемые весовые коэффициенты $K_{p_i} = \{K_{p_i}; K_{\theta_S}; K_{\lambda_S}\}$ относятся к координатам ИКО, преобразованными в топоцентрическую систему координат с началом в опорном наземном пункте. Ось X_S этой системы направлена в зенит опорного пункта, Z_S - к "северу" касательно поверхности Земли, Y_S - к "востоку". Величина K_p относится к ошибке



Р и с. 4

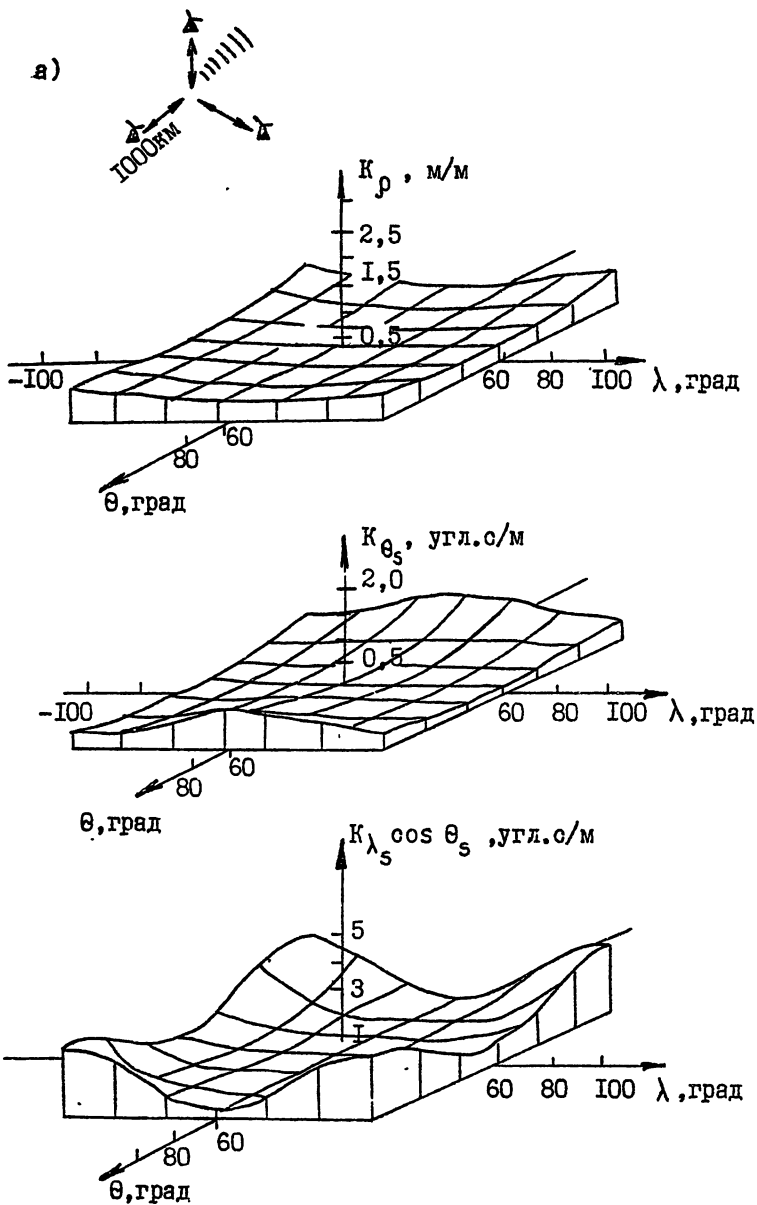


Р и с. 5

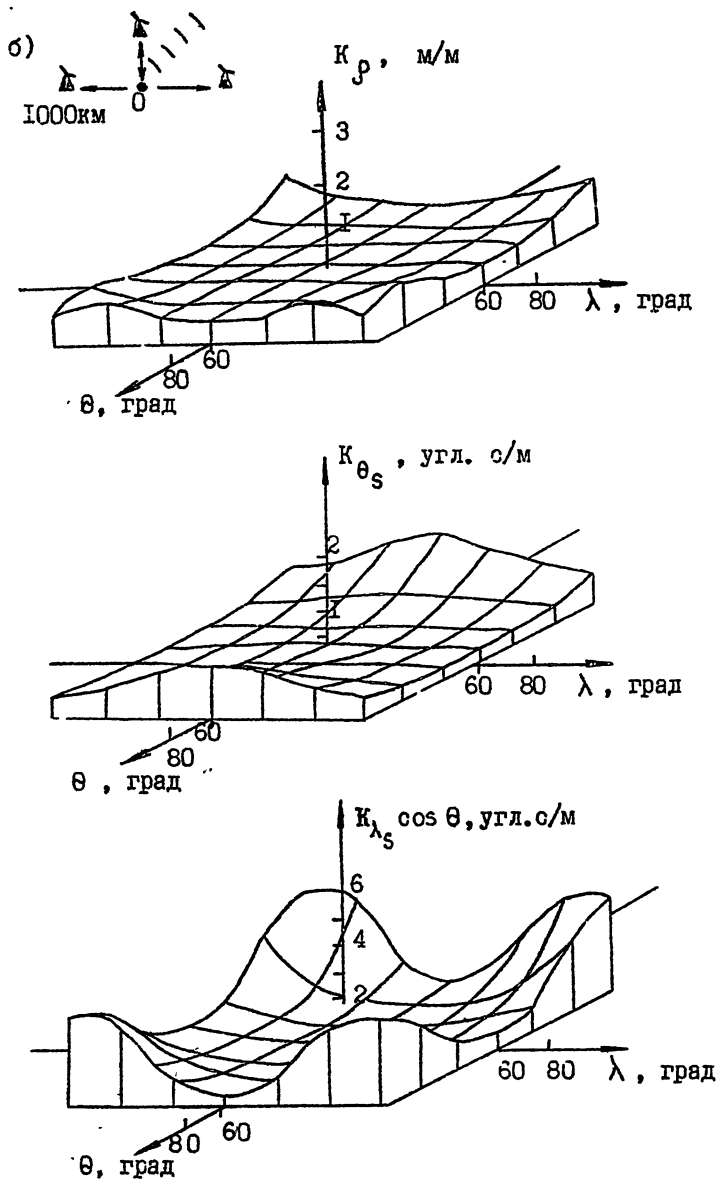
определения дальности от опорного наземного пункта до ИКО; величины K_{θ_S} и K_{λ_S} относятся к ошибкам определения направления на ИКО из того же пункта в широтном θ_S и долготном λ_S направлениях, определяемых аналогично величинам θ и λ .

Для удобства параметры K_p , K_{θ_S} и K_{λ_S} приведены ниже в размерностях, выражающих величину приращения ошибки соответствующей координаты ИКО на каждый метр полной ошибки измерения пространственной задержки $\sigma_{\Delta r}^*$, а именно: величина K_p - в размерности (м/м), а величины K_{θ_S} и K_{λ_S} в размерности (град/с/м). Кроме того во всех случаях весовой коэффициент K_{λ_S} домножался на величину $\cos \theta_S$. Результаты вычислений приведены на графиках рисунков 6 + 13.

На рис.6 и 7 для варианта Б построения комплекса показана зави-



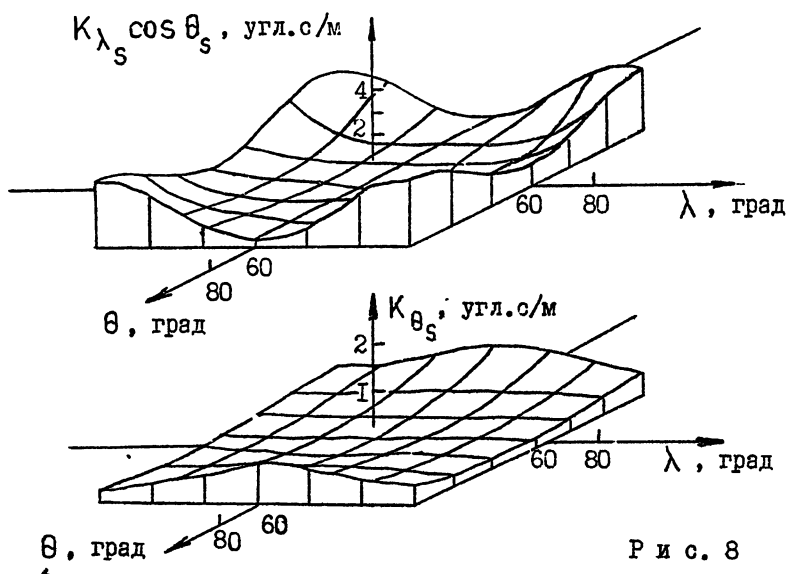
Р и с. 6



Р и с . 7

симость ошибок измерения координат ИКО от его геоцентрических угловых координат θ и λ при $H = 20$ тыс. км для конфигураций апертуры "а" и "б" при $d = 1000$ км (см. рис. 5). Вычисления производились в пределах области углов $\Delta \theta$ и $\Delta \lambda$ одновременной видимости ИКО со всей площади апертуры комплекса при зенитных углах наблюдения, не превышающих 80° в каждом приемном пункте.

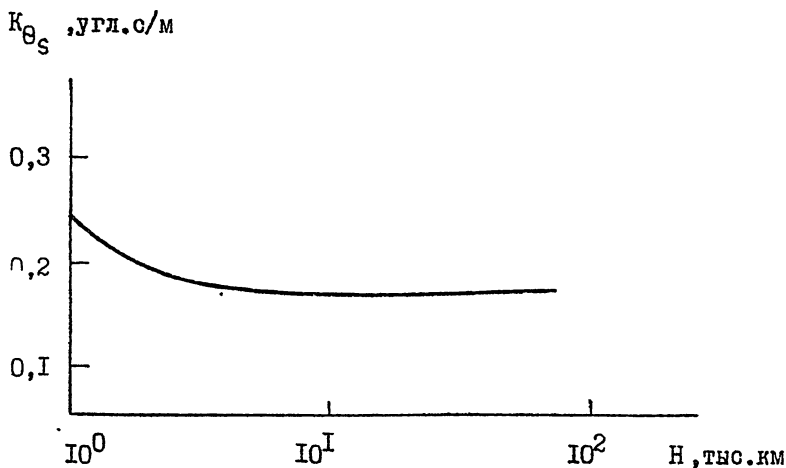
Из рис. 6 и 7 следует, что зависимость ошибок определения координат ИКО от его углового положения в целом довольно слабая и характер этой зависимости незначительно зависит от расположения приемных пунктов в площади апертуры одного и того же радиуса. Например, ошибка определения дальности увеличивается к границам области видимости относительно ее центра в 1,9 раза для конфигурации "а" и в 2,7 раза - для "б". Погрешность определения θ_S максимально увеличивается к "северу" и к "югу" от опорного пункта - в 4,8 и 5 раз соответственно. Ошибка определения долготы также довольно плавная на большей части области видимости и только на самых границах возрастает существенно. Лучший результат дает симметричная конфигурация "а". При конфигурации "б" разрешающая способность по углу θ_S примерно в два раза хуже разрешающей способности по λ_S в центре области видимости. На рис. 8 показана зависимость от θ и λ ошибок угловых измерений для конфигурации апертуры "а", которая отличается от конфигурации "а" тем, что излучающая станция перенесена в северный приемный пункт 2 при сократившемся до трех общем числе наземных пунктов. Этот случай



Р и с . 8

соответствует варианту В построения комплекса. Это совершенно не повлияло на погрешность угловых измерений, но, поскольку в пункте 2 теперь фактически расположен радиодальномер, ошибка измерения дальности перестала зависеть от θ и λ и равна стандартной величине 0,5 м/м. Аналогичный результат получается и для конфигурации "б".

Анализ погрешностей, приведенный нами для варианта построения комплекса А (разностно-дальномерный) показал, что, как и следовало ожидать, погрешности измерения угловых координат ИКО для всех трех рассматриваемых вариантов практически совпадают при одинаковых конфигурациях апертур (см. рис. 4 и 5). На рис. 9 показана зависимость погрешностей определения угловых координат в центре области видимости от высоты ИКО над Землей (конфигурация "а", $d = 1000$ км). С увеличением H эти погрешности несколько уменьшаются и, начиная с $H \approx 3d$, перестают, практически, зависеть от H .



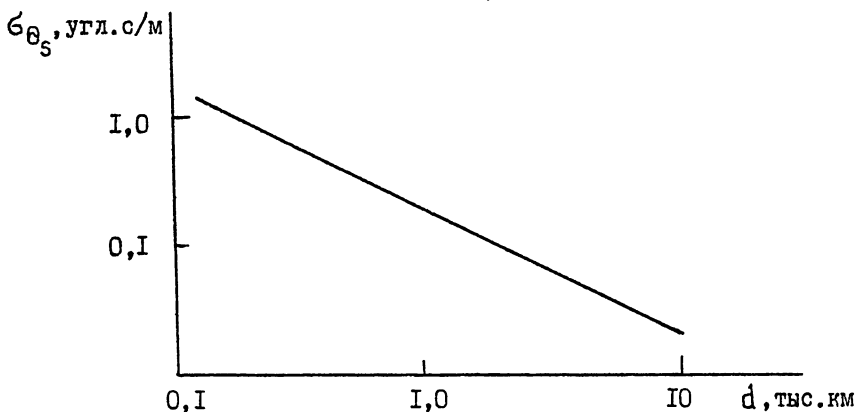
Р и с. 9

На рис. 10 показана зависимость погрешности угловых измерений в центре области видимости от радиуса апертуры координатного комплекса при $H = 20$ тыс. км. В логарифмическом масштабе график хорошо описывается прямой линией с единичным наклоном и соответствует типичному для интерферометрии закону:

$$K_{\theta_s} \approx K_{\lambda_s} \cos \theta_s \approx \frac{0,18}{d \text{ (тыс. км)}} \text{ (угл. с/м)}. \quad (25)$$

При избыточном числе приемных пунктов эти ошибки несколько уменьшаются. Если имеются N наземных пунктов, то вместо выражения (25) справедливо

$$K_{\theta_s} \approx K_{\lambda_s} \cos \theta_s \approx \frac{0,32}{\sqrt{N} d} \text{ (угл.с/м)} \quad (26)$$



Р и с. 10

Если учесть увеличение погрешностей на краях области видимости в 3 - 4 раза, то получим в окончательном виде оценочные соотношения, характеризующие погрешность измерения угловых координат ИКО для длиннбазовых систем:

$$K_{\theta_s} \approx K_{\lambda_s} \cos \theta_s \leq (3 + 4) \frac{0,32}{\sqrt{N} d} \text{ (угл.с/м)} \quad (27)$$

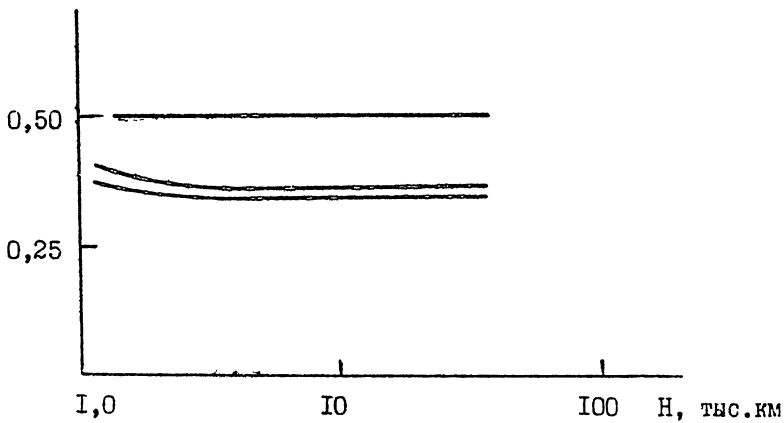
На рис. II показана зависимость погрешности определения расстояния до ИКО от N в центре области видимости для конфигураций апертуры "а" и "б" (вариант Б построения комплекса) и "а" и "б" (соответствует варианту В) при $d = 1$ тыс. км.

Оценочное соотношение, характеризующее погрешность измерения дальности до ИКО длиннбазовыми дальномерными системами, имеет следующий вид:

$$K_p \approx \frac{0,5}{\sqrt{N}} \text{ (м/м)}. \quad (28)$$

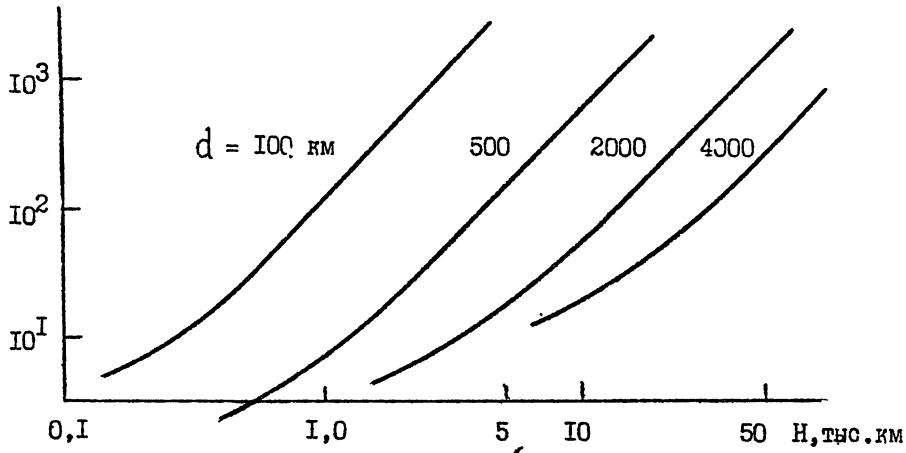
Погрешность измерения расстояния до ИКО разностно-дальномерной системой (вариант А) существенно зависит от N . На рас. 12 показана для данного варианта зависимость K_p от N при различных значениях

K_{ρ} , м/м



Р и с. I I

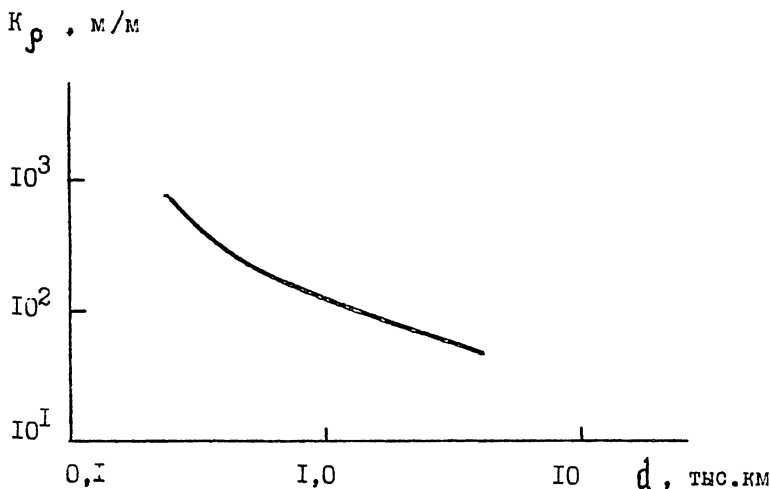
K_{ρ} , м/м



Р и с. I 2

d (конфигурация "а" на рис.4). На рис.13 показана зависимость K_p от d в центре области видимости для той же конфигурации при $H=20$ тыс. км. На краях области видимости K_p возрастает в 5 - 6 раз аналогично погрешности угловых измерений. Анализ дает следующий вид оценочного соотношения, характеризующего погрешность измерения дальности до ИКО разностно-дальномерной системой:

$$K_p \approx 5 \frac{2,5 H^2}{\sqrt{N} d^2} \quad (\text{м/м}). \quad (29)$$



Р и с. 13

II. Из приведенных выше соотношений следует, что при оптимальных (с точки зрения обеспечения максимальной видимости ИКО на разных высотах - см.п.7) радиусах апертуры длиннобазового комплекса $d \approx 1 \div 1,5$ тыс. км для обеспечения точности угловых измерений $< 0",5$ полная погрешность определения пространственной задержки $\sigma_{\Delta r_*}$ не должно превышать 2 - 3 метра. Для обеспечения точности измерения дальности до ИКО $\sigma_p \approx 100$ м длиннобазовой дальномерной системой требуется точность измерения Δr_i не хуже 50 метров.

Разностно-дальномерная система для обеспечения заданной точности измерения расстояния при дальности до ИКО ~ 100 тыс. км. требует нереализуемо высокие точности измерения величин Δr_i .

Из соотношений (21) и (22) следует, что для достижения заданной точности угловых измерений калибровки интерферометрического координатного комплекса должна выполняться очень точно - так, чтобы суммарный вклад погрешностей σ_{S_i} и $\sigma_{\Delta t_i}$ в полную ошибку измерения пространственной задержки не превышал бы 2 - 2,5 м. Процедура калибровки должна обеспечивать определение отсчетной системы для координатных измерений: длин и ориентаций базовых линий, задающих линейный масштаб измерений и начало отсчета углов, а также - рассинхронизация временных шкал в наземных пунктах комплекса, задающих начало отсчета для измерений пространственных задержек сигналов. Единственным способом калибровки, который обеспечивает необходимую точность координатных измерений, является определение параметров баз и рассинхронизации часов по РСДБ наблюдениям внегалактических источников космического радиоизлучения, задающих практически идеально инерциальную систему координат. Измеренные координаты ИКО при этом также оказываются привязанными к этой инерциальной системе отсчета. Таким образом, в состав комплекса точного определения координат ИКО должны входить астрометрические средства, организованные по принципам длиннобазовой радиоинтерферометрии и способные принимать сигналы астрофизических источников с относительно слабой интенсивностью излучения.

Задача определения длины и ориентации базовой линии интерферометра может быть решена при квазиодновременном наблюдении группы минимум из четырех квазаров, либо при наблюдении 2 - 3-х квазаров в нескольких последовательных положениях их на небесной сфере, разделенных промежутками времени в несколько часов. Потенциально достижимая точность таких измерений характеризуется величиной $\sigma_S \leq 5 - 10$ см, что было подтверждено экспериментально в США. Следует подчеркнуть, что параметры базовой линии подвержены изменениям во времени из-за влияния движения полюсов и неравномерного вращения Земли, дрейфа материковых плит земной коры и т.п., причем, величина этих изменений может существенно ограничивать точность измерения координат ИКО. Поэтому калибровка базовых линий должна выполняться периодически (по крайней мере, один раз в месяц).

Система временного обеспечения координатного комплекса должна быть организована на базе высокостабильных атомных стандартов частоты-времени, используемых в качестве хранителей шкал времени. Нестабильность частоты задающих генераторов стандартов приводит к нестационарному расхождению показаний часов в приемных пунктах, первоначально однократно засинхронизированных, с величиной $\Delta t_t \approx \delta f \cdot t$, где δf - относительная нестабильность частоты стандартов, t - про-

межутки времени от проведения сеанса синхронизации. Кроме того, некоторая малая разность номиналов частот стандартов приводит к линейному расхождению шкал времени вида αt , где α — относительная разность номиналов частот, по порядку величины обычно соответствующая величине δf . Даже при максимально достигнутой стабильности частоты водородного генератора $\delta f = 10^{-14}$ шкалы времени в приемных пунктах разойдутся только за одни сутки на величину ~ 1 нс (30 см — для пространственной задержки). Поэтому требуется проведение периодических (1–2 раза в сутки) сверок времени. Задача однократной сверки времени решается по однократному наблюдению квазара при известных параметрах базовых линий РСДБ и известных координатах источника излучения, что обеспечивается описанными выше калибровочными измерениями. Потенциальная точность синхронизации шкал времени с использованием методов РСДБ составляет $\approx 0,6\text{--}0,7$ нс (18–20 см — для пространственной разности хода).

Для проведения калибровочных РСДБ измерений наземные пункты координатного комплекса должны быть оборудованы полноповоротными радиотелескопами с эффективной площадью ≈ 300 м² и специализированной радиоастрометрической аппаратурой.

Оперативность получения результатов калибровочных измерений для принятой в РСДБ методики записи сигналов от радиоисточников на магнитные ленты с последующей транспортировкой лент в пункт обработки характеризуется промежутком времени в несколько суток. Повышение оперативности может быть достигнуто передачей информативных сигналов по широкополосным линиям связи.

12. Суммарная среднеквадратичная погрешность задания электрической толщи тропосферы (по приземным значениям температуры, давления и влажности) и ионосферы (по априорным моделям) составляет величину ~ 20 см при $\lambda = 5$ см. Причем, основной вклад на этих несущих частотах вносит неопределенность содержания и распределения водяного пара в атмосфере. На больших зенитных углах наблюдения ИКО $\sim 70\text{--}80^\circ$ эта величина возрастает до 60–70 см, а если учесть еще двухкратное прохождение радиосигналов через атмосферу и ионосферу в процессе работы координатного комплекса, то получим $[\sigma_{\text{Трп}}^2 + \sigma_{\text{ион}}^2]^{1/2} \approx 90$ см. Вклад ионосферы в суммарную погрешность при $\lambda = 5$ см мал, и может быть еще уменьшен повышением рабочей несущей частоты.

На рабочих частотах ~ 1 ГГц основной вклад в неопределенность электрической толщи вносит ионосфера. Полная электрическая толщина ионосферы в этом диапазоне составляет ~ 12 метров с неопределенностью ее задания по априорным усредненным данным $\approx 1,5$ метра. Поэтому

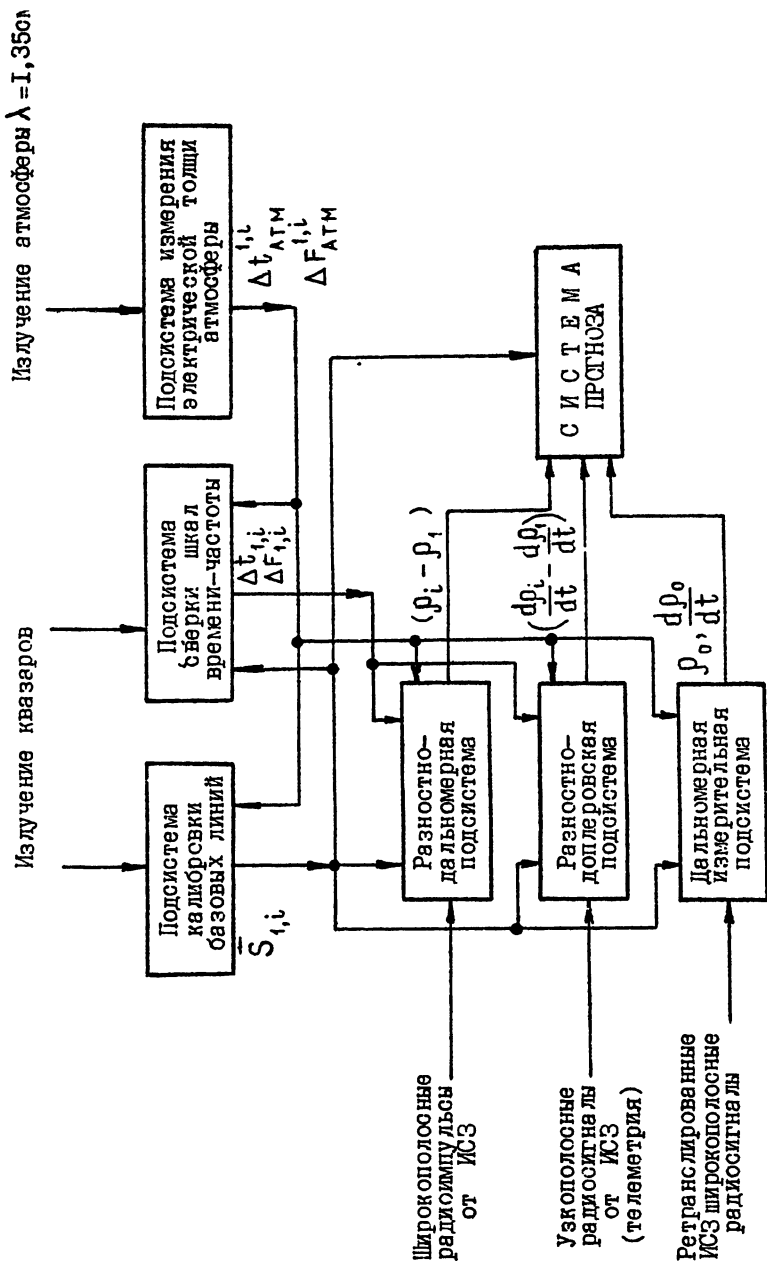
следует ожидать, что при $\lambda = 30$ см погрешность измерения пространственной задержки, обусловленная ионосферой, составит $\leq 3-4$ метра. Задача приближения точности координатных измерений к потенциальной требует проведения специальных измерений набега пути радиосигналов в тропосфере. При этом измерительный комплекс должен содержать в своем составе ^{АППАРАТУРУ} для измерения электрической толщи тропосферы в направлении на определяемый ИКО. Поскольку основной вклад в неопределенность электрической толщи вносит атмосферный водяной пар, то целесообразно применение для решения поставленной задачи так называемого метода теплолокации [7], состоящего в измерении интенсивности собственного излучения атмосферы в линии воды на частоте 2,2 ГГц и определении на основании этих измерений интегрального запаздывания радиосигналов, вызванного парами воды. Такие измерения позволяют уменьшить неопределенность длин трасс в 3-5 раз, то есть получить $\sigma_{\text{ГРi}} \approx 15-20$ см на больших зенитных углах и ≈ 3 см около зенита.

13. На рис. 14 изображен возможный вариант структурной схемы построения РСДБ измерительной системы для навигационного обеспечения полетов ИСЗ на высотных (в том числе высокоэллиптических) орбитах, а на рис. 15 проиллюстрирована геометрия системы. Такая система может быть, например, использована для точного определения вектора базовой линии наземно-космического радиointерферометра (проект "Радиоастрон") [8].

Измерительная система состоит из трех основных взаимно информативно дополняющих друг друга подсистем, а также ряда служебных подсистем, обеспечивающих калибровку измерительной системы в целом. Данные от измерительной системы поступают в систему прогноза эфемерид, в которой производится вычисление орбиты ИСЗ.

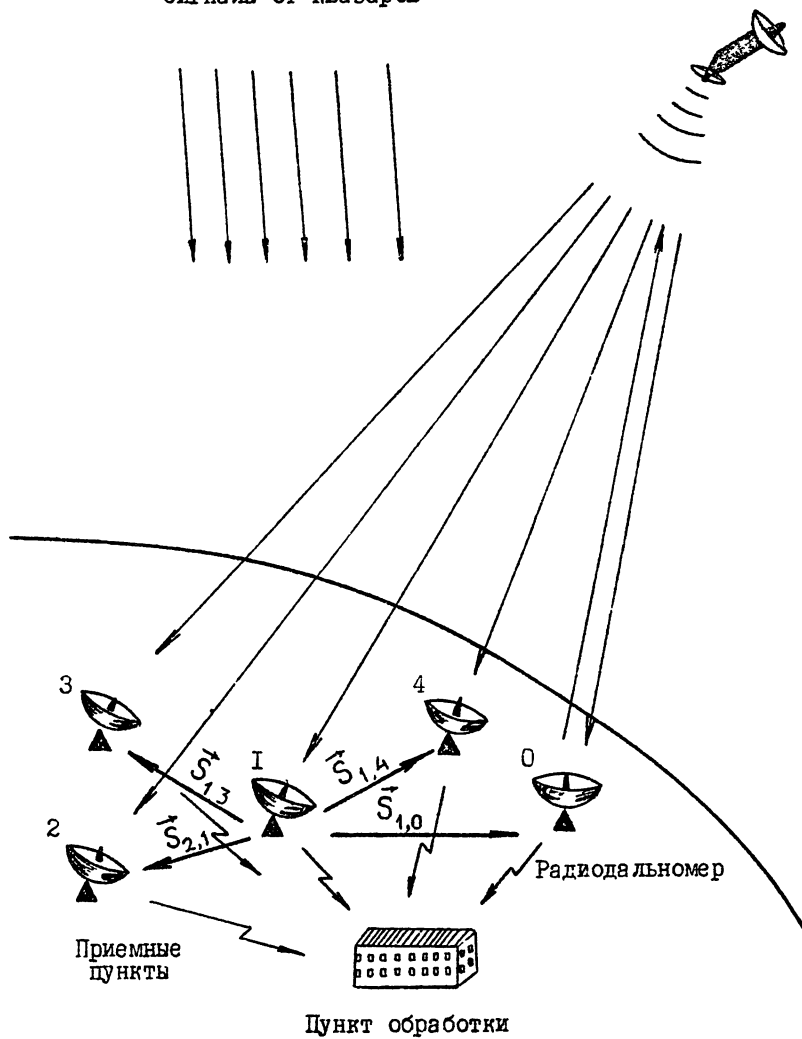
13.1. Измерительные подсистемы.

13.1.1. Разностно-дальномерная подсистема (широкополосная радиointерферометрия) обеспечивает точное измерение угловых координат объекта. Она содержит четыре наземных приемных пункта, разнесенных на расстоянии 1,5-3,5 тыс. км и пункт обработки информации. Принимаемые от ИСЗ радиосигналы - широкополосные радиоимпульсы с псевдошумовым заполнением сантиметрового диапазона длин волн. При этом объект должен иметь бортовую передающую антенну с широкой диаграммой направленности, обеспечивающей засветку всех наземных приемных пунктов. Необходимая излучаемая мощность $\geq 0,1$ Вт (при применении приемных антенн с эффективной площадью > 200 м²). В каждом приемном пункте производится автономное измерение моментов времени $t_i = c\rho_i$ (ρ_i - дальность до ИСЗ) прихода радиосигналов в масштабе местной шкалы времени и эти данные передаются в пункт обработки по обычным телеграфным кана-



Ф и г. 1 ' 4

Сигналы от квазаров



Р и с. 1 5

лам. В пункте обработки з измеренные величины вводятся калибровочные и редуционные поправки и вычисляются временные задержки $\tau_{i,1} = c(\rho_i - \rho_1)$, где ρ_i - дальность между ИКО и условно выбранным опорным приемным пунктом подсистемы. Временные задержки $\tau_{i,1}$, содержащие информацию об угловом положении объекта, передаются затем в систему прогноза для вычисления его эфемерид.

13.1.2. Дальномерная измерительная подсистема действует автономно. В систему прогноза она выдает информацию о дальности от приемно-передающей наземной станции до объекта и его радиальной скорости.

13.1.3. Разностно-доплеровская измерительная подсистема (узкополосная радиоинтерферометрия) обеспечивает точное измерение вектора скорости углового перемещения по небу при наличии информации о пространственных координатах объекта и его радиальной скорости от системы прогноза (от первых двух измерительных подсистем). Может быть также использована и для самостоятельного определения угловых координат объекта, но информативность и точность ее существенно ниже, чем у разностно-дальномерной подсистемы. Подсистема содержит несколько (не менее трех) наземных приемных пунктов и пункт сбора и обработки информации. Наземные пункты совмещены с аналогичными пунктами разностно-дальномерной подсистемы. Принимаемые радиосигналы - телеметрическая информация от ИКО дециметрового и (или) сантиметрового диапазонов. Применение двухчастотного приема желательно для исключения влияния ионосферы на распространение радиоволн. Принимаемые узкополосные радиосигналы после их когерентного преобразования в область низких частот передаются в цифровой форме в пункт обработки по малоинформативным, с полосой в несколько килогерц, линиям связи. В пункте обработки в реальном времени производится измерение разностей частот принятых информативных радиосигналов (частот интерференции), из которых после введения соответствующих калибровочных и редуционных поправок выделяются разностные доплеровские сдвиги $\Delta F_{i,1}$ частот, содержащие информацию о векторе скорости и его пространственных координатах: $\Delta F_{i,1} = \frac{f_0}{c} \left(\frac{d\rho_i}{dt} - \frac{d\rho_1}{dt} \right)$, где f_0 - несущая частота излучаемых объектом сигналов, ρ_i - дальность от опорного и i -го приемных пунктов до объекта. Величины $\Delta F_{i,1}$ передаются затем в систему прогноза. Продолжительность одного сеанса измерения $\sim 200-300$ с.

13.2. Служебные подсистемы.

13.2.1. Подсистема калибровки базовых линий служит для точного задания положений наземных приемных пунктов измерительной системы в квазиинерциальной системе координат, закрепленной внегалактическими радиоисточниками, и для отслеживания изменений этих положений со вре-

менем. Используются те же антенные системы, что и в измерительных подсистемах (эффективная площадь 200–300 м²), диапазон работы – сантиметровый. Принимаемые радиосигналы – излучение квазаров и ядер радиогалактик. Принимаемые радиосигналы – излучение квазаров и ядер радиогалактик. Приемные пункты и пункт обработки оборудованы специализированной радиоастрометрической аппаратурой. Продолжительность сеанса наблюдения радиисточников в однократной калибровочной процедуре 4 часа. Задержка выдачи результатов калибровки (время обработки радиоастрометрической информации) 6–7 суток. Ориентировочная периодичность процедур калибровки один раз в месяц. Полученная информация о параметрах базовых линий передается в систему проноза, пункт обработки измерительной системы, а также – в подсистему сверки шкал времени–частоты.

ИЗ.2.2. Подсистема сверки шкал времени–частоты предназначена для точной синхронизации шкал времени в приемных пунктах (для обеспечения работы разностно–дальномерной измерительной подсистемы), а также – для измерения разностей номиналов частот задающих стандартов в приемных пунктах (для обеспечения работы разностно–доплеровской измерительной подсистемы). Принимаемые радиосигналы – излучение квазаров и ядер радиогалактик. Используется та же приемно–анализирующая аппаратура, что и в подсистеме калибровки базовых линий. Продолжительность сеанса наблюдения радиисточников в однократной сверке шкал 30 мин. Периодичность сеансов синхронизации определяется характеристиками используемых стандартов времени–частоты. Для водородных стандартов с относительной частотной нестабильностью $(1-3) \cdot 10^{-14}$ ориентировочная периодичность – 1–2 раза в сутки. Задержка выдачи результатов синхронизации 3–4 суток при оперативной транспортировке магнитных записей сигналов радиисточников в пункт обработки и ~ 1 суток при передаче информативных сигналов в пункт обработки по широкополосным (~ 4 МГц) линиям связи.

ИЗ.2.3. Подсистема измерения электрической толщи атмосферы служит для определения временных задержек радиосигналов в тропосфере и измерения сдвигов их несущих частот. Измерения проводятся автономно в каждом приемном пункте измерительной системы путем наблюдения собственного радиоизлучения атмосферы в линии водяного пара $\lambda = 1,35$ см.

ИЗ.2.4. Для обеспечения работы измерительной координатной системы необходим еще ряд подсистем и служб, в число которых входят: служба времени–частоты в каждом приемном пункте и подсистемой предварительной синхронизации стандартов по радиосигналам СЕВ, служба сбора метеорологической информации (температура, давление, влажность) в приемных пунктах, служба обеспечения всей системы связью и некоторые другие.

ИЗ.3. Потенциально достижимую точность определения положения ИСЗ

в пространстве с помощью измерительной системы, структура которой описана выше, можно оценить величиной ≈ 20 метров в однократном измерении при дальности до объекта 100 тыс. км. Каждая из трех основных измерительных подсистем, в принципе, может решить координатную задачу автономно, но максимальную точность можно получить только соединением их в единую систему. Периодичность проведения сеансов координатных измерений определяется по заданной точности навигационного обеспечения с учетом точностных возможностей системы прогноза эфемерид.

Л и т е р а т у р а

1. Гонтарь И.Д., Шульга В.Ф. Фазометр с большой базой // Радиотехника и электроника. - 1967. - Т.12, №1. - С. 19-21.
2. А.с. 258454 СССР, 601ч29/02. Устройство формирования когерентных сигналов радиointерферометра/В.А. Алексеев, В.Д. Кротиков (СССР). - № 1208444/26-9; Заявлено 08.01.68; Оpubл. 03.12.69. Бюл. № 1 // Открытия. Изобретения. - 1970. - № 1.
3. Алексеев В.А., Липатов Б.Н., Щакогов Б.В. Радионастроения с применением дифференциальных интерферометрических измерений на сверхдлинных базах // Изв. вузов - Радиофизика. - 1976. - Т.14, № 11. - С. 1669-1677.
4. Парийский Ю.Н., Стоцкий А.А. О возможностях получения радиоизображений небесных тел с разрешением выше 10^{-2} секунды дуги // Изв. ГАО. - 1972. - №188. - С. 195-212.
5. Тихонов В.И. Статистическая радиотехника. - М.: Радио и связь. - 1982. - 623 с.
6. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники Кн.2. - М.: Сов. радио. - 1968. - 504 с.

7. Шапер мл., Стилин, Уотерс. Оценка электрической длины пути в тропосфере методом СВЧ радиометрии//ТИИЭР. - 1970. - Т.58, №2. - С. 161-162.
8. Андреянов В.В., Кардашев Н.С. Проект наземно-космического радиointерферометра с длиной базы до 1 млн. км и когерентной радиосвязью между телескопами. // Космические исследования. - 1981. - Т,19, № 5. - С. 763-772.

Дата поступления статьи

26 августа 1987 г.

Валерий Александрович Алексеев

Эдуард Дмитриевич Гатэлук

Борис Николаевич Липатов

СВЕРХДЛИННОБАЗОВАЯ РАДИОИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ :
ОПРЕДЕЛЕНИЕ КООРДИНАТ ИСКУССТВЕННЫХ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Подписано в печать 03.12.87 г. Мд 00647. Формат 60x84/16
Бумага писчая. Печать офсетная. Объем 2,17 усл. п. л.
Заказ 4645. Тираж 150. Бесплатно

Отпечатано на ротапринте НИРФИ