

Научно-исследовательский радиофизический институт  
Министерства образования Российской Федерации

Препринт N 454

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

Часть 2

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

Нижний Новгород 1999

Дугин Н. А., Кузнецова И. П., Разин В. А., Смышляева Г. Г.  
Применение малобазовых радиоастрономических интерферометров для координатных и траекторных измерений. Часть 2. // Препринт № 454. — Нижний Новгород: НИРФИ, 1999. 24 с.

УДК 520.274

Во второй части статьи приводятся разработанные алгоритмы расчёта фрагментов траектории полёта космического аппарата (КА) по записи принятого двухэлементным радиоастрономическим интерферометром с двухканальным корреляционным приёмником излучаемого КА сигнала. Приведены результаты первых экспериментов, проведённых на интерферометре НИРФИ с базой 60 м на частоте 152 МГц по сигналам ИСЗ типа “Цикада” (“Транзит”).

В работе [1] рассмотрены возможности проведения координатных, траекторных и навигационных измерений космических аппаратов (КА) с помощью радиоастрономических интерферометров, позволяющих проводить высокоточные измерения разности фаз принимаемых антеннами сигналов в реальном времени; проведены оценки точности измерений координат КА; кратко рассмотрен дифференциальный метод, позволяющий обеспечить наиболее высокую точность измерений.

В настоящей работе описаны первые эксперименты, выполненные на двухэлементном радиоинтерферометре НИРФИ метрового диапазона [2]. На этом инструменте проведены записи сигналов космических аппаратов. Прием сигналов от КА проводился одновременно с наблюдениями внеземных естественных радиоисточников, что позволило реализовать дифференциальный метод координатных измерений. В описанной ниже серии наблюдений параметры орбит спутников не были известны. Задача состояла в том, чтобы определить по интерферометрическим записям фрагменты траекторий полета ИСЗ [3].

Наблюдения проводились в период 1996–1998 гг. на интерферометре с параметрами:

- антенны параболические полноповоротные с диаметром зеркал 14 м;
- расстояние между антеннами 60 м, ориентация базы близка к линии Восток–Запад;
- рабочая частота 152 МГц;
- приемник корреляционный с квадратурным выходом, полоса частот 2 МГц, чувствительность 0,7 К при постоянной времени 1 с;
- погрешность системы фазовой калибровки порядка  $2^\circ$ ;
- эквивалентное угловое разрешение  $40''$  при ошибке измерения фазы  $2^\circ$  (имеется в виду минимальное изменение одной из координат КА при указанном изменении разности фаз принимаемых сигналов).

Далее изложены алгоритмы расчетов, методика и результаты определения фрагментов траектории полета КА по записи интерференционного сигнала, проведенной с помощью двухканального корреляционного приемника с переключением фазы.

## 1. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ И АЛГОРИТМЫ РАСЧЕТОВ

Радиоинтерферометр позволяет измерять разность фаз сигналов, принятых антеннами от радиисточника. Если источник имеет координаты  $\delta$  (склонение) и  $t$  (часовой угол), то эта разность фаз (в дальнейшем для краткости именуемая “фаза”) определяется выражением [1]

$$\varphi = \varphi_{\text{инт}} + \frac{2\pi}{\lambda} [L \sin \delta + (M \cos t + N \sin t) \cos \delta], \quad (1)$$

где  $\varphi_{\text{инт}}$  — инструментальная разность фаз,  $\lambda$  — длина волны, а  $L, M, N$  — проекции базы в экваториальной системе координат

$$\begin{aligned} L &= B \sin \delta_B, \\ M &= B \cos \delta_B \cos t_B, \\ N &= B \cos \delta_B \sin t_B, \end{aligned} \quad (2)$$

$B$  — длина базы,  $\delta_B$  и  $t_B$  — склонение и часовой угол вектора базы. Величины  $L, M, N$  связаны с проекциями базы в горизонтальной системе координат  $X, Y, Z$  (ось  $x$  ориентирована в направлении север — юг, ось  $y$  — восток — запад, ось  $z$  — в зенит) соотношениями

$$\begin{aligned} L &= -X \cos \varphi_g + Z \sin \varphi_g, \\ M &= X \sin \varphi_g + Z \cos \varphi_g, \\ N &= Y, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $\varphi_g$  — географическая широта места установки интерферометра. В нашем случае

$$\begin{aligned} X &= 2,55 \text{ м}, & L &= -0,0052 \text{ м}, \\ Y &= 60,01 \text{ м}, & M &= 3,053 \text{ м}, \\ Z &= 1,68 \text{ м}, & N &= 60,01 \text{ м}, \\ \varphi_g &= 55^\circ 39' 07'',2. \end{aligned}$$

Величину  $\varphi_{\text{инт}}$  можно представить как сумму

$$\varphi_{\text{инт}} = \varphi_{\text{инт}}^{\text{H}} + \varphi_{\text{инт}}^{\text{K}},$$

где  $\varphi_{\text{инт}}^{\text{K}}$  — разность электрических длин трактов интерферометра, определяемая системой внутренней фазовой калибровки, в дальнейшем эта величина вычитается из измеренной фазы и в расчетах не участвует.  $\varphi_{\text{инт}}^{\text{H}}$  — не контролируемая системой фазовой калибровки разность электрических длин трактов (до точки введения калибровочного сигнала), включающая в себя погрешности фазы, возникающие из-за нежесткости конструкций антенн, тепловых и механических деформаций зеркал, неточности наведения на источник, атмосферных эффектов и др. В общем случае при внешней калибровке инструмента по наземным радиоисточникам  $\varphi_{\text{инт}}^{\text{H}}$  является неизвестным параметром и определяется вместе с проекциями базы, т. е. в дифференциальном методе измерений в соотношении (1) для разности фаз сигналов от КА величина  $\varphi_{\text{инт}}^{\text{H}}$  известна и вычитается из  $\varphi$ , как и  $\varphi_{\text{инт}}^{\text{K}}$ . В данном эксперименте при одновременном наблюдении сигналов КА и космического радиоисточника  $\varphi_{\text{инт}}^{\text{H}}$  была определена по сигналу последнего, основные расчеты велись только для неизвестных координатных параметров КА.

В случае внешней калибровки по радиоисточникам интерферометра с абсолютно идентичными антеннами определяются малые поправки неизвестных параметров — проекций базы  $\Delta L$ ,  $\Delta M$ ,  $\Delta N$  и  $\varphi_{\text{инт}}^{\text{H}}$  по линейному соотношению (1). Методика измерений заключается в наборе массива данных  $\varphi_{ij}(t_i, \delta_j)$  по нескольким радиоисточникам с разными  $\delta_j$  в течение длительного

периода наблюдений  $t_i \in (-\pi, \pi)$  [4]. Далее проводится решение системы линейных уравнений (1) методом наименьших квадратов [5] с вычислением погрешностей всех искомых параметров.

При нахождении координат источника излучения с постоянными  $(\alpha, \delta)$  при известных  $\varphi_{\text{инт}}^n$ ,  $L$ ,  $M$ ,  $N$  предпочтительна процедура линеаризации системы уравнений, что легко выполняется при условии задания грубых значений координат и малых искомых поправок:  $\alpha = \alpha_0 + \Delta\alpha$ ,  $\delta = \delta_0 + \Delta\delta$ . Источник необходимо наблюдать в широком интервале часовых углов  $t_i$ , математический аппарат решения задачи определения координат источника аналогичен решению задачи калибровки базы [4].

Если же наблюдается источник с переменными экваториальными координатами (КА, ИСЗ), то для нахождения неизвестных координат источника, вообще говоря, необходимо одновременно провести интерферометрические измерения инструментами с различными базами. При использовании одного интерферометра возникает необходимость сделать некоторые дополнительные предположения о характере движения объекта. Продолжительность регистрации сигнала КА определяется временем его пребывания в пределах диаграммы направленности (ДН) антенн — элементов интерферометра. В наших измерениях длительность сеансов наблюдения КА была невелика (как правило  $\sim 1$ –3 мин). Поэтому было принято, что на протяжении таких интервалов времени координаты КА изменяются с постоянной скоростью и могут быть представлены в виде

$$\begin{aligned}\alpha(T) &= \alpha_0 + \omega_\alpha(T - T_0), \\ \delta(T) &= \delta_0 + \omega_\delta(T - T_0),\end{aligned}\tag{4}$$

где  $\alpha$  — прямое восхождение объекта,  $T$  — декретное время,  $T_0$  — момент начала регистрации сигнала КА,  $\alpha_0$ ,  $\delta_0$  — координаты в момент  $T_0$ ,  $\omega_\delta$ ,  $\omega_\alpha$  — скорости изменения координат. Часовой угол  $t$  связан с прямым восхождением  $\alpha$  соотношением

$$t(T) = s(T) - \alpha(T),\tag{5}$$

где  $s(T)$  — звездное время в пункте наблюдения в момент  $T$ :

$$s(T) = s_0 + \varepsilon(T - T_0);$$

$s_0$  — звездное время в момент  $T_0$ ,  $\varepsilon = 7,29211586 \cdot 10^{-5}$  рад/с — угловая скорость вращения небесной сферы (изменение звездного времени в угловых единицах за секунду солнечного времени). Таким образом, изменение часового угла КА связано как с его собственным движением, так и с вращением небесной сферы и определяется выражением

$$\begin{aligned} t(T) &= t_0 + \varepsilon(T - T_0) + \omega_t(T - T_0), & (6) \\ t_0 &= s_0 - \alpha_0, \\ \omega_t &= -\omega_\alpha \end{aligned}$$

(здесь  $\omega_t$  — не скорость изменения часового угла, а скорость изменения прямого восхождения, взятая с обратным знаком!).

Фрагмент траектории КА определяется четырьмя параметрами:  $\delta_0$ ,  $\omega_\delta$ ,  $t_0$ ,  $\omega_t$ . Система уравнений для решения координатной задачи имеет вид

$$\varphi(T_k) - \phi_k = 0, \quad k = 0, 1, 2, \dots, n, \quad n \geq 3. \quad (7)$$

Здесь  $n$  — число отсчётов, произведённых за время регистрации сигнала КА,  $\phi_k$  — фаза, измеренная в момент  $T_k$ ,  $\varphi(T_k)$  — расчетная фаза, определяемая выражением (1). Входящий в (1) параметр  $\varphi_{\text{инт}}$ , как уже говорилось, определяется калибровкой и вычитается из измеренной фазы, тогда система (7) принимает вид

$$\frac{2\pi}{\lambda} \left\{ L \sin \delta(T_k) + [M \cos t(T_k) + N \sin t(T_k)] \cos \delta(T_k) \right\} - \phi_k = 0. \quad (7.1)$$

При продолжительности записи сигнала КА около 1 мин с дискретом выборки 1 с система (7) содержит  $n \sim 60$  уравнений и

решается методом наименьших квадратов (НК), т.е. минимизацией суммы квадратов невязок:

$$\chi^2 = \sum_k (\varphi(p, T_k) - \phi_k)^2, \quad (8)$$

где  $p$  — вектор параметров траектории:

$$p = \begin{pmatrix} \delta_0 \\ \Delta\delta \\ t_0 \\ \Delta t \end{pmatrix}.$$

Вместо скоростей изменения координат  $\omega_\delta$ ,  $\omega_t$  взяты величины  $\Delta\delta = \omega_\delta \Delta T$  и  $\Delta t = \omega_t \Delta T$ , где  $\Delta T$  — продолжительность регистрации сигнала КА. В этом случае все компоненты вектора  $p$  имеют одинаковую размерность. Условие минимума суммы (8) дает систему четырех уравнений для компонент вектора  $p$ :

$$\sum_k (\varphi(p, T_k) - \phi_k) \frac{\partial \varphi(p, T_k)}{\partial p_i} = 0, \quad i = 0, 1, 2, 3. \quad (9)$$

Система уравнений (9) нелинейна, решение её относительно компонент вектора  $p$  затруднительно, в связи с чем была применена следующая процедура (метод Ньютона): сообразуясь с координатами центра ДН антенн и временем пролета через них КА, задаётся некоторое нулевое приближение  $p_0$ , и вектор параметров траектории представляется в виде

$$p = p_0 + \Delta p.$$

Если нулевое приближение выбрано достаточно хорошо, можно считать компоненты вектора поправок  $\Delta p$  достаточно малыми и, разложив левые части уравнений системы (9) в ряд около точки  $p_0$  до членов 1-го порядка, получить таким образом линейную систему уравнений для компонент вектора поправок  $\Delta p_i$

$$a_{ij} \cdot \Delta p_j = d_i, \quad i = 0, \dots, 3; \quad j = 0, \dots, 3. \quad (10)$$



Коэффициенты системы (10):

$$a_{i,j} = \sum_k \frac{\partial \varphi(p_0, T_k)}{\partial p_i} \frac{\partial \varphi(p_0, T_k)}{\partial p_j} - [\phi_k - \varphi(p_0, T_k)] \frac{\partial^2 \varphi(p_0, T_k)}{\partial p_i \partial p_j}, \quad (11)$$

$$d_i = \sum_k [\phi_k - \varphi(p_0, T_k)] \frac{\partial \varphi(p_0, T_k)}{\partial p_i}.$$

После решения (10) новое значение  $p = p_0 + \Delta p$  подставляется в (11) в качестве  $p_0$  и процедура повторяется до тех пор, пока разность между двумя последовательными решениями не становится меньше некоторой наперед заданной величины.

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 1 изображена запись выходных сигналов SIN- и COS-каналов приемника при наблюдении космического радионисточника Кассиопея А, по оси абсцисс отложено время в секундах, отсчитываемое от момента начала записи, по оси ординат — выходной сигнал в мВт. Во временном промежутке 450 ÷ 650 с хорошо виден сигнал КА, проходящего через ДН антенн. В интервале 475 ÷ 530 с усиление приемника уменьшено на 20 дБ из-за значительного превышения интенсивности сигнала КА над сигналом радионисточника в главном лепестке ДН. Этот фрагмент (ниже называемый интервалом “0”) и был использован для обработки. Хорошо виден также сигнал КА в двух боковых лепестках ДН: временные промежутки 545–585 с (интервал “1”) и 600–650 с (интервал “2”).

Обработка полученной записи включала следующие операции.

1. Исключение сигнала Кассиопея А (штриховые кривые на рис. 1, построены методом НК по фрагментам записи, не содержащим сигнала ИСЗ) для определения нулевых уровней сигналов КА.

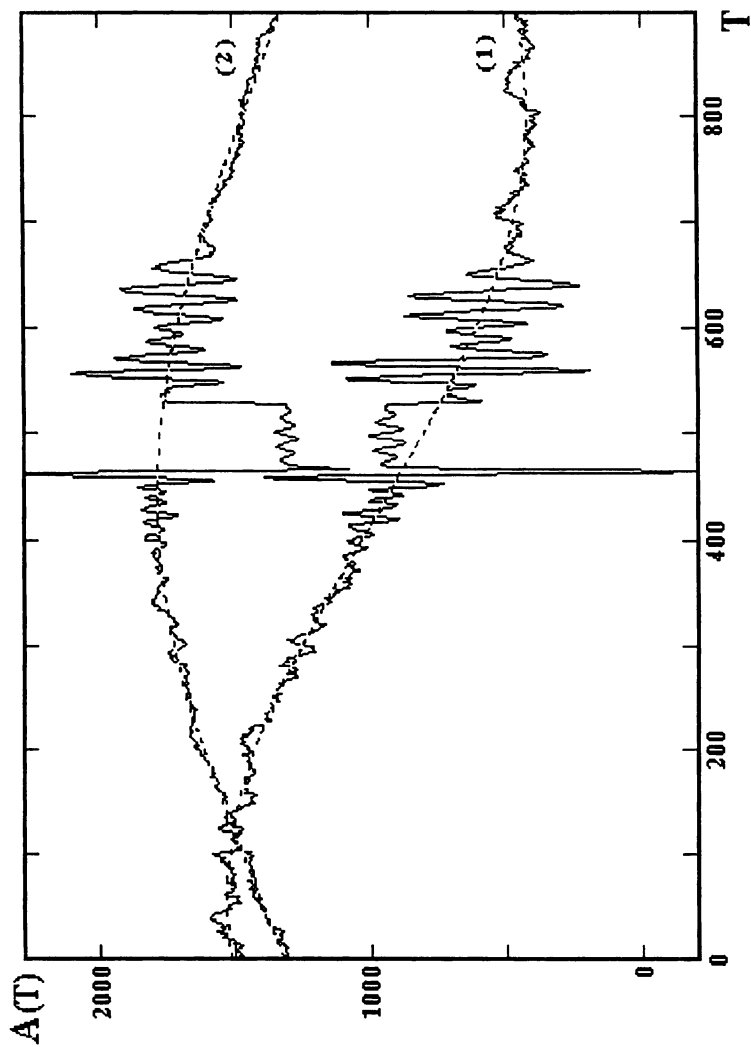


рис. 1

Кривая (1) — выход синусного канала, (2) — косинусного при  
записи источника Кассинуса А.

2. Коррекция записей на неидентичность усиления каналов и сдвиг фаз, отличный от  $\pi/2$ . Эта процедура подробно описана в [1, 4]. Запись сигнала Кассиопеи А использована также для оценки инструментальной разности фаз  $\varphi_{\text{инт}}$ .

3. Определение фазы  $\phi_k$  из соотношения

$$\phi_k = \text{Arctg} \left[ \frac{A_s(T_k)}{A_c(T_k)} \right] - \varphi_{\text{инт}}, \quad (12)$$

где  $A_s(T_k)$  и  $A_c(T_k)$  — скорректированные выходы SIN- и COS-каналов. Фаза, определяемая соотношением (12), содержит неопределенность  $\pm 2\pi n$ , которая была устранена, исходя из известных координат осей антенн и естественного предположения, что КА прошел вблизи центрального луча. На рис. 2 представлена временная зависимость фазы  $\phi$  для трех упомянутых выше интервалов (по оси абсцисс отложено время в секундах, отсчитываемое от начала интервала “0”).

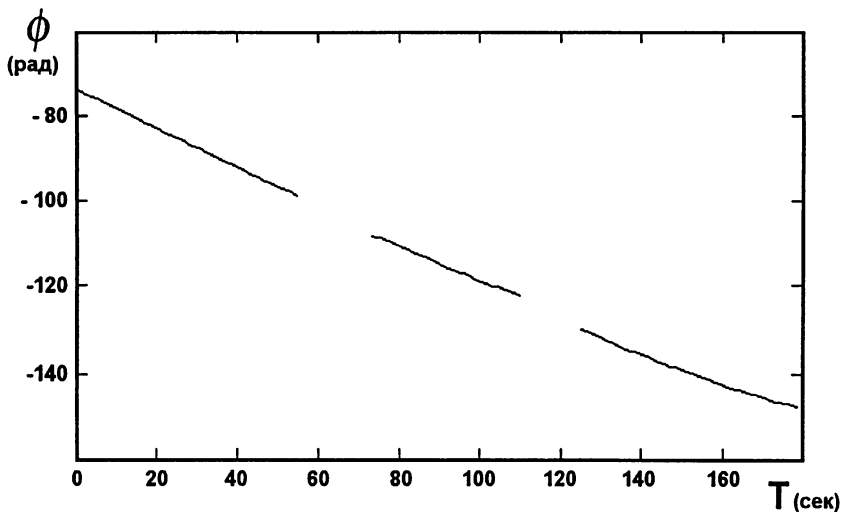


Рис. 2.

4. Определение параметров фрагмента траектории КА — решение системы уравнений (10) для трех временных отрезков.

Начальное нулевое приближение вектора параметров фрагмента траектории  $p_0$  для интервала “0” выбиралось исходя из предположения, что КА прошёл через центральный луч ДН и было принято:  $p_0 = \{1,06; -0,12; -2,28; 0,17\}$  (компоненты вектора  $p_0$  выражены в радианах). После серии итераций было получено окончательное значение:

$$p = \begin{pmatrix} 1,0805 \\ -0,1058 \\ -2,2380 \\ 0,2186 \end{pmatrix}.$$

Кроме вышеописанной процедуры для определения вектора параметров траектории  $p$  применялась также функция GENFIT математического редактора Mathcad+5,0. В качестве первого нулевого приближения было взято то же значение  $p_0$  и полученный в конечном итоге вектор  $p_{gf}$  совпадает с  $p$  до 6-го знака, хотя “история” итерационного процесса существенно различается, что можно видеть на рис. 3, на котором изображена зависимость компонент векторов  $p$  и  $p_{gf}$  от номера итерации.

На рис. 4 представлена расчетная временная зависимость фазы  $\varphi(p, T)$  (сплошная кривая) вместе с экспериментальными точками  $\phi_k$  (крестики) для главного лепестка. Среднеквадратичное отклонение точек  $\phi_k$  от кривой  $\varphi$  составляет  $\sigma_0 = 3^\circ,86$ , или 1,2 угловой минуты в направлении на КА при критерии оценки углового положения  $\sigma_\theta \sim \sigma_\varphi \lambda / 2\pi B$ . Это в 2–3 раза хуже расчетного предела точности нашего инструмента. Причиной этому могут быть ионосферные мерцания, хорошо видимые на записи Кассиопеи А, аппаратурные факторы и ошибки обработки при разделении сигналов различных источников; ошибку, вносимую системой фазовой калибровки, в данном случае можно считать систематической.

Определяя скорости изменения координат из соотношений  $\omega_\delta = p_1 / \Delta T_0$  и  $\omega_t = p_3 / \Delta T_0$ , где  $\Delta T_0$  — продолжительность

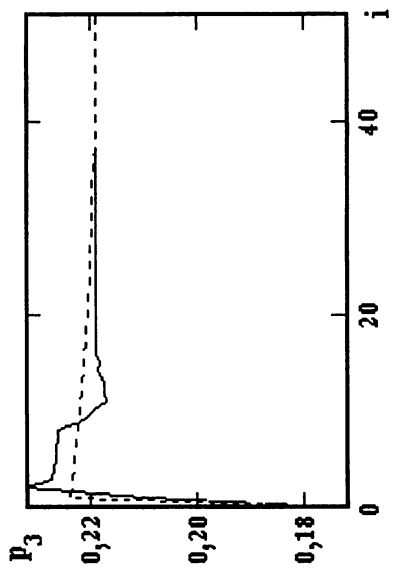
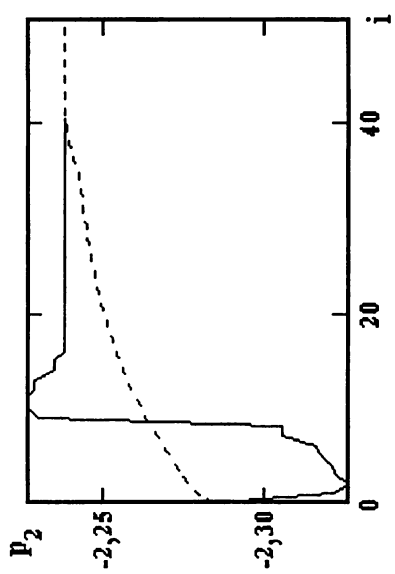
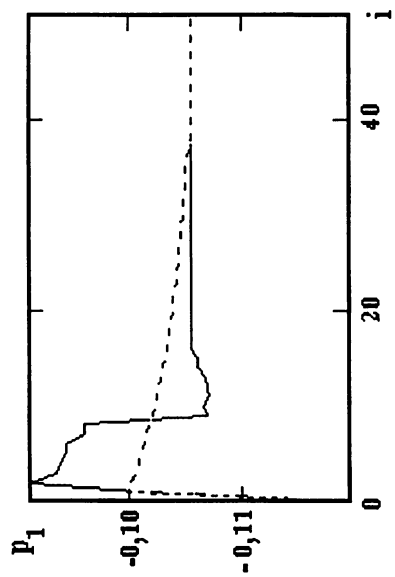
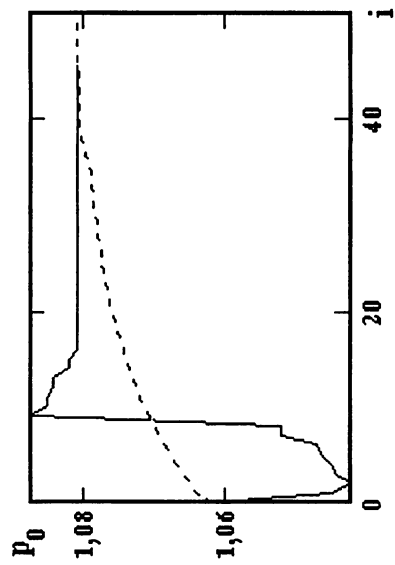


рис. 3

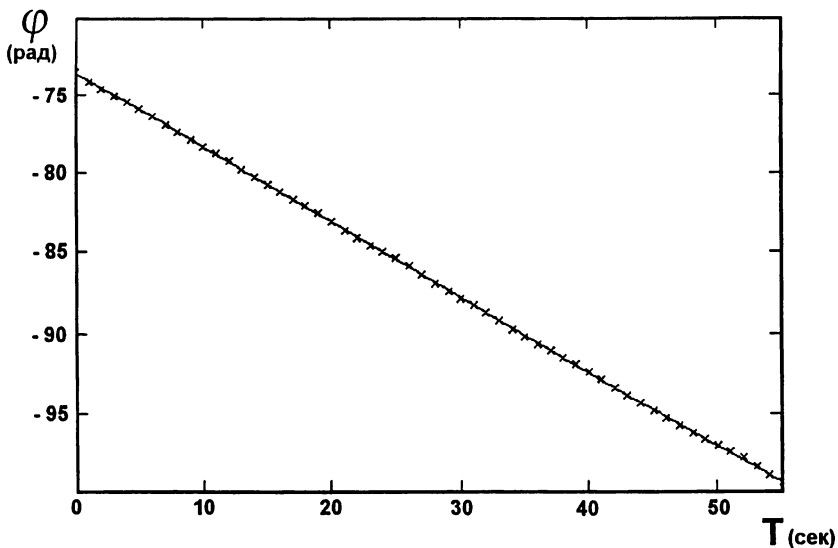


Рис. 4.

интервала "0", получаем следующие параметры траектории КА в главном лепестке ДН:

$$\begin{aligned} \delta_0 &= 61^{\circ},9 \pm 0^{\circ},3, & \omega_{\delta} &= (-0,1102 \pm 0,0004) \text{ гр/с}, \\ t_0 &= -128^{\circ},2 \pm 0^{\circ},8, & \omega_t &= (0,228 \pm 0,006) \text{ гр/с}. \end{aligned} \quad (13)$$

Для оценки точностей полученных параметров траектории использовалась процедура, описанная в [5].

Рассмотрение траектории полета КА через боковые лепестки ДН представляло интерес как с точки зрения оценки результатов для слабых сигналов, так и оценки систематических ошибок, вызванных предполагаемой неидентичностью фазовых ДН приемных антенн.

Ввиду отсутствия информации о фазовой диаграмме направленности антенн представляется разумным находить вышеописанным способом только два параметра траектории, а именно скорости изменения координат, определяя начальную точку

экстраполяцией траектории, полученной для предыдущего временного отрезка. Для полученных таким способом кривых расчетной фазы в интервалах “1” и “2”,  $\varphi_1(p_1, T)$  и  $\varphi_2(p_2, T)$ , среднеквадратичные отклонения экспериментальных точек  $\phi_{1k}$  и  $\phi_{2k}$  составили:  $\sigma_1 = 10^\circ,35$  и  $\sigma_2 = 7^\circ,60$ . Параметры траектории КА в боковых лепестках соответственно:

$$\delta_{1_0} = 58^\circ,87 \pm 0^\circ,3, \quad \omega_{1_\delta} = (-0,11 \pm 0,005) \text{ гр/с}, \quad (13.1)$$

$$t_{1_0} = -111^\circ,30 \pm 0^\circ,9, \quad \omega_{1_t} = (0,22 \pm 0,03) \text{ гр/с},$$

$$\delta_{2_0} = 48^\circ,23 \pm 0^\circ,3, \quad \omega_{2_\delta} = (-0,14 \pm 0,0004) \text{ гр/с}, \quad (13.2)$$

$$t_{2_0} = -99^\circ,43 \pm 1^\circ,1, \quad \omega_{2_t} = (0,23 \pm 0,005) \text{ гр/с}.$$

Траектория КА во всём промежутке времени, в течение которого регистрировался его сигнал, изображена на рис. 5 в координатах  $(\delta, t)$ . Крестиком на рисунке отмечено направление центрального луча ДН приемных антенн, эллипсы — контуры главного лепестка ДН на уровнях 0,5 и 0,1, пунктирные кривые — линии постоянной фазы с интервалом  $2\pi$  и три отрезка представляют три фрагмента траектории. Квадратиком на рисунке отмечена точка с координатами  $(t_0, \delta_0)$ , часть отрезка выше нее соответствует промежутку времени 450–475 с от начала записи (рис. 1). Из рисунка видно, что траектории в главном и первом боковом лепестках хорошо “сшиваются”, во втором лепестке заметно некоторое изменение угла наклона полученной траектории по сравнению с двумя остальными. Причину следует определять после построения расчетной траектории полёта ИСЗ.

Таким образом, при пролёте КА через несколько интерференционных лепестков, т.е. в направлениях, близких к ориентации базы, решение задачи о параметрах траектории достаточно надежно и однозначно. Однако большинство ИСЗ, излучающих на рабочей частоте интерферометра, имеют околосферные орбиты и движутся перпендикулярно базе нашего инструмента. Большая часть проведенных записей сигналов КА

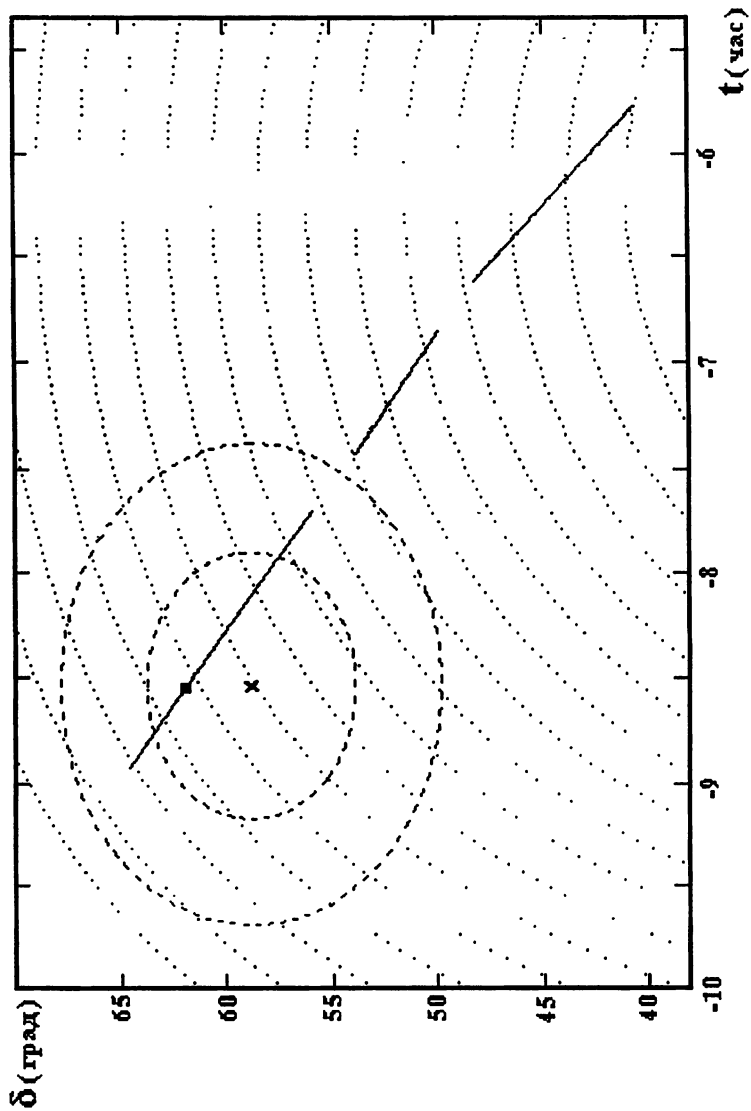


рис. 5



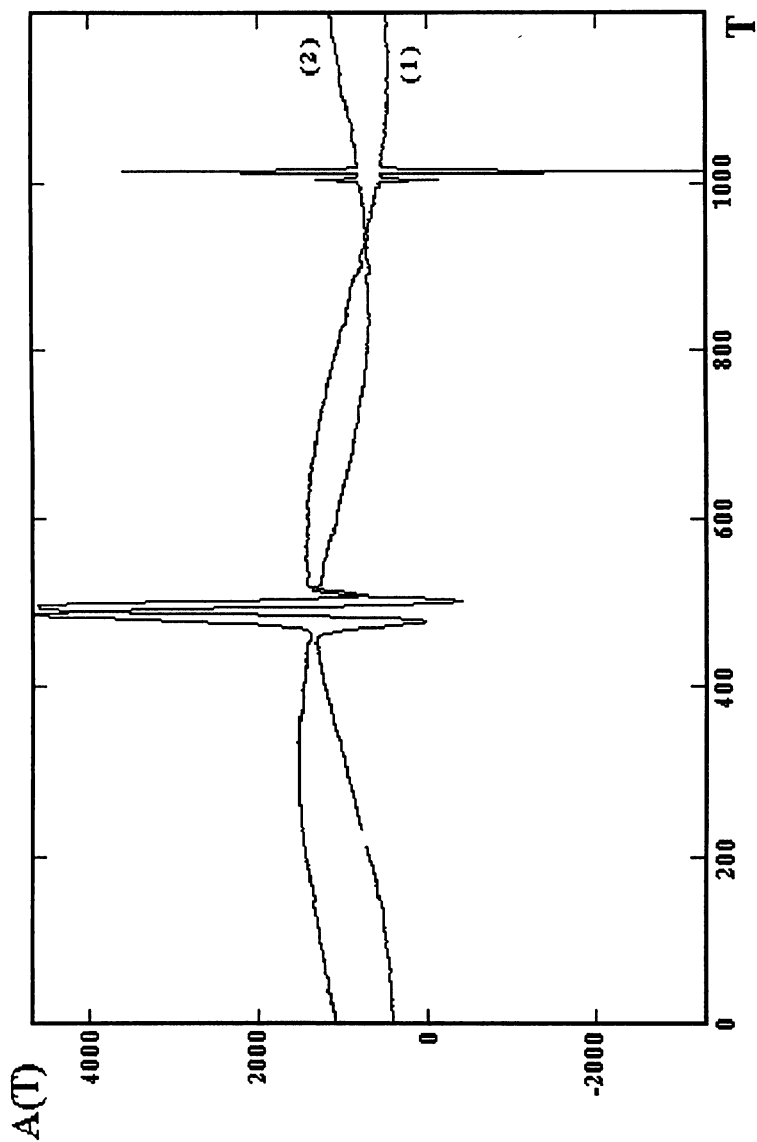


рис. 6

Кривая (1) - выход синусного канала, (2) - косинусного при записи радионисточника Лебедь А; велесек справа - импульсная помеха.

имеет вид, подобный той, которая изображена на рис. 6. Запись получена при наблюдении космического источника Лебедь А. Сигнал спутника хорошо виден в интервале  $\Delta T \approx 460-520$  с от начала записи, всплеск справа — импульсная помеха.

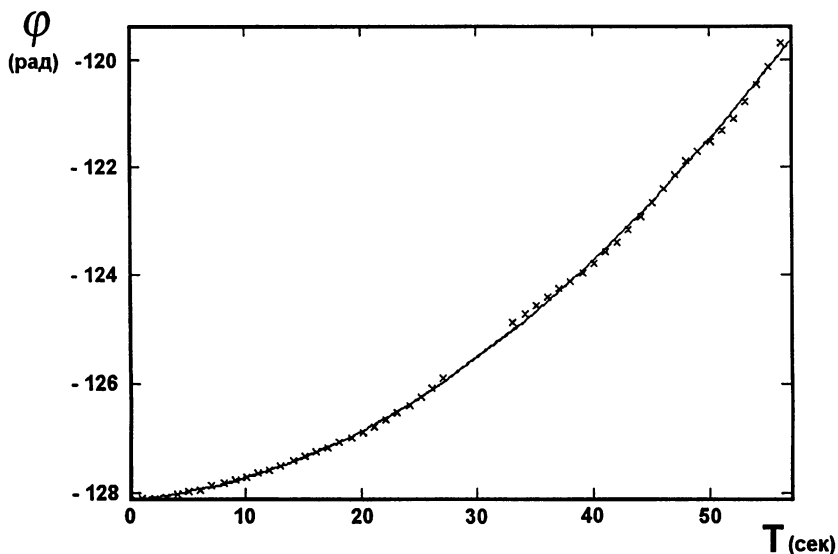


Рис. 7.

На рис. 7 крестиками изображена временная зависимость измеренной фазы за время регистрации сигнала КА. Видно, что в отличие от рис. 2 эта зависимость нелинейна, из чего следует, что движение КА происходит вдоль интерференционного лепестка. В этом случае решение усложняется, возникает несколько вариантов траектории, удовлетворяющих измеренной фазовой зависимости (рис. 8). Сплошная кривая на рис. 7 представляет расчетную временную зависимость фазы для траекторий № 1 и 1' на рис. 8 (в масштабе рисунка две кривые слились в одну). Среднеквадратичные отклонения экспериментальных точек от расчётных кривых приведены в таблице 1. Далее, на рис. 8 изображены ещё четыре траектории, построенные с учетом того, что, как уже говорилось, измеренная фаза содер-

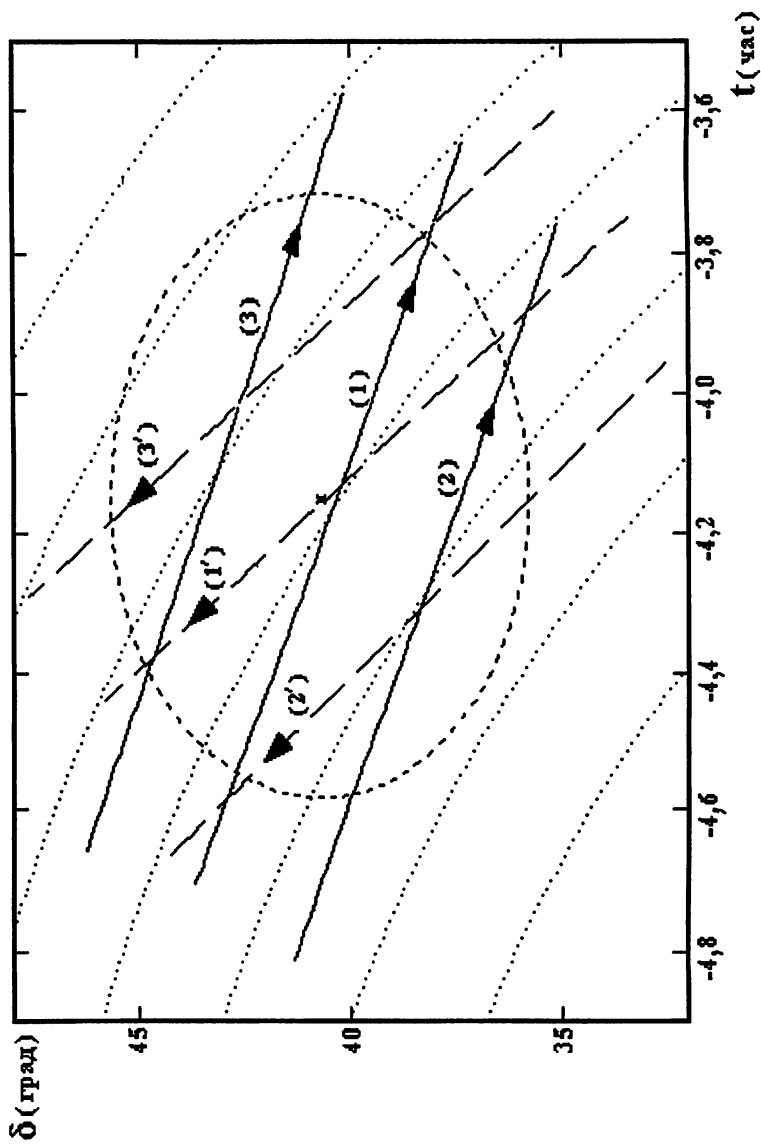


рис. 8

жит неопределенность  $\pm 2\pi n$  и у нас нет оснований быть уверенными, что траектория КА пересекает ДН антенн — элементов интерферометра в максимальной близости к центральному лучу. Траектории № 2 и 2' построены для случая  $\phi_k^{(2)} = \phi_k - 2\pi$ , № 3 и 3' — для  $\phi_k^{(3)} = \phi_k + 2\pi$ . Соответствующие среднеквадратичные отклонения точек  $\phi_k^{(2)}$  и  $\phi_k^{(3)}$  от расчетных фазовых кривых также приведены в таблице 1. Эллипсом на рис. 8 изображён контур ДН на уровне 0,5, видно, что траектории № 2, 2' и 3, 3' проходят внутри этого контура.

Таблица 1

Траектория	$\sigma$
№ 1	3°,8274
№ 1'	3°,8833
№ 2	3°,8292
№ 2'	3°,8949
№ 3	3°,8244
№ 3'	3°,8811

Для КА, орбиты которых в грубом приближении известны и требуется только уточнение параметров траектории, описанные выше неоднозначности не критичны. Однако ясно, что для траекторных измерений необходимо использовать интерферометры с существенной проекцией базы в направлении Север—Юг или два инструмента с ортогональными базами, то есть проекции базы на направления Север—Юг и Восток—Запад должны быть приблизительно одинаковы, чтобы можно было измерять все шесть элементов орбиты КА.

Исходя из полученных результатов, можно заключить, что первые экспериментальные работы по использованию радиоастрономических интерферометров в решении прикладных траекторных задач подтвердили теоретические разработки о возможности применения и высокой эффективности радиоин-

терферометров со связанными элементами в космической навигации.

Результаты проведенного эксперимента позволяют сделать вывод, что радиоастрономические интерферометры с корреляционным двухканальным приемником можно использовать для оперативного измерения элементов траектории полета КА. В сравнении с фазометрическими радиотехническими системами и штатными навигационными средствами они имеют следующие преимущества:

- работа может вестись по квазишумовому сигналу (со спектром фазоманипулированного кодового сигнала), что исключает влияние доплеровского эффекта, рабочая частота определяется частотами гетеродинов приемника и может быть измерена с требуемой точностью;
- для интерферометра, определяющего разность фаз сигналов, угловое положение КА не зависит от регулярной рефракции в атмосфере, а при небольших базах крупномасштабные и медленно меняющиеся возмущения в ионосфере также не влияют на результат;
- данные о траектории полета выдаются практически сразу после окончания записи, что можно использовать для контроля целостности, например, созвездия НИСЗ типа “ГЛОНАСС”, а при соответствующих параметрах инструмента определять ошибки в определении положения КА, рассчитываемого по данным альманаха соответствующего возраста;
- при использовании антенн с диаметрами зеркал  $\gtrsim 10$  м возможна привязка траектории полета к внеземным опорным радиисточникам (квазарам, радиогалактикам), по которым проводится калибровка базы интерферометра.

В дальнейшем предполагается осуществить наблюдения КА с заранее рассчитанными орбитами, провести сравнения результатов, более полно исследовать погрешности измерений и способы их уменьшения.

## Литература

1. Дугин Н. А., Кузнецова И. П., Разин В. А., Смышляева Г. Г. Применение малобазовых радиоастрономических интерферометров для координатных и траекторных измерений. Часть 1 // Препринт N 450. — Нижний Новгород: НИРФИ, 1999. 36 с.
2. Дугин Н. А., Добрушский Л. А., Кузнецова И. П., Вьюгин В. Д. Трехантенная система апертурного синтеза метрового диапазона. Тез. докл. XXVI Радиоастрономической конференции. — С.-Петербург, 1995.
3. Дугин Н. А., Кузнецова И. П., Разин В. А., Смышляева Г. Г., Старостин В. Н. Определение фрагментов траектории полета КА радиоинтерферометром со связанными элементами. Тр. конф. Радиолокация, навигация, связь. RLNC-99. — Воронеж, 1999.
4. Дугин Н. А. Разработка и исследование двухэлементной системы апертурного синтеза. Канд. дис. — Горький: НИРФИ, 1983.
5. Щиголев Б. М. Математическая обработка наблюдений. — М.: Гос. изд. физ.-мат. лит., 1960.

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

ПРИМЕНЕНИЕ МАЛОБАЗОВЫХ РАДИОАСТРОНОМИЧЕСКИХ  
ИНТЕРФЕРОМЕТРОВ ДЛЯ КООРДИНАТНЫХ И ТРАЕКТОРНЫХ  
ИЗМЕРЕНИЙ

Часть 2

---

Подписано в печать 18. 11. 99 г. Формат 60 × 84/16.  
Бумага писчая. Печать офсетная. Объем 1,6 усл. п. л.  
Тираж 50. Заказ 5490.

---

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