

Федеральное государственное научное учреждение
“Научно-исследовательский радиофизический институт”

Препринт № 517

**К ВОПРОСУ ОБ ИЗМЕРЕНИИ УГЛОВЫХ КООРДИНАТ
КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА С ПОМОЩЬЮ
ИНТЕРФЕРОМЕТРА**

Е. Н. Виняйкин
Л. А. Кривоспицкий
И. П. Кузнецова
В. П. Павлов
А. М. Пасека
В. А. Разин
Г. Г. Смышляева
А. И. Теплых
Б. С. Формозов

Нижний Новгород 2007

Е. Н. Виняйкин, Л. А. Кривоспицкий, И. П. Кузнецова, В. П. Павлов, А. М. Пасека, В. А. Разин, Г. Г. Смышляева, А. И. Теплых, Б. С. Формозов. К вопросу об измерении угловых координат космического аппарата с помощью интерферометра // Препринт №517. Нижний Новгород: ФГНУ "НИРФИ", 2007. – 13 с.

Проведен эксперимент по измерению координат космического аппарата "Космос-2414" интерферометром. Эксперимент выполнялся с помощью короткобазового радиоинтерферометра на частоте 150 МГц в Радиоастрономической обсерватории "Старая Пустынь" ФГНУ НИРФИ.

ВВЕДЕНИЕ

Интерферометры с короткими базами и связанными с помощью линий передачи антеннами являются высокоточными угломерными инструментами [1, 2]. Процесс измерения угловых координат естественных и искусственных радиоисточников состоит из ряда основных этапов: определение вектора базы в той или иной системе координат и инструментальной разности фаз, привязка часов к шкале точного времени, собственно угловые измерения путем регистрации интерференционного сигнала и, наконец, восстановление координат источника в зависимости от времени. Определенным преимуществом интерферометров с короткими (менее 100 м) базами является почти полное отсутствие влияния тропосферы и ионосферы на фазу интерференционного сигнала [3].

В данной работе осуществлен эксперимент по измерению угловых координат космического аппарата (КА) "Космос-2414".

АППАРАТУРА

Для проведения эксперимента был модернизирован радиоинтерферометр, состоящий из двух идентичных 14-м параболических радиотелескопов (РТ-14Е — восточный и РТ-14W — западный) с фокусными расстояниями 4,6 м, центральная частота $f = 150$ МГц. Ширина диаграммы направленности каждого из радиотелескопов на уровне 0,5 по мощности составила 10° . Длина базы интерферометра $B = 60,06$ м, ориентация близка к линии "Восток-Запад". Каждый из радиотелескопов интерферометра оснащен специально разработанным облучателем. Облучатель крепится на цилиндрической штанге, жестко закрепленной у вершины параболического рефлектора, и совмещается с геометрической осью рефлектора. Совмещение фазового центра облучателя с фокусом рефлектора достигается

перемещением облучателя вдоль штанги. Облучатели реализованы на закороченном отрезке коаксиального волновода. Внутренним проводником коаксиального волновода служит штанга. Размер коаксиального облучателя выбирался из условия возбуждения в нём волны только первой высшей моды H_{11} , что соответствует диаметру $0,8\lambda$ (λ — длина волны). В облучателе на центральной трубе размещены два взаимно перпендикулярных симметричных вибратора, расположенных в одной плоскости на расстоянии около $\lambda/4$ от закороченной стенки волновода. Каждый симметричный вибратор соединён с одним из входов высокочастотного (ВЧ) переключателя через симметрирующее устройство и согласующий четвертьволновый трансформатор. В данной работе использовался один из вибраторов (вертикальная поляризация), на другой вход ВЧ переключателя подключалась согласованная нагрузка. Высокочастотный тракт проложен внутри штанги и далее из пилона радиотелескопа подается в специальный контейнер, проложенный между радиотелескопом и технологическим помещением, где располагается приемная аппаратура.

Для приема сигнала КА использован разработанный ранее в НИРФИ одноканальный корреляционный интерферометрический радиометр с приемником прямого усиления на центральную частоту 150 МГц. Шумовая температура приемника 250 К, полоса пропускания равна 1 МГц на уровне 0,5 по мощности, использовалась постоянная времени интегрирующей цепочки $\tau = 0,25$ с (кроме измерений 26.08.06, когда использовалась $\tau = 1$ с). Система регистрации интерферометрического сигнала реализована на базе компьютера **OmniBook XE3** и электронного самописца **PCS100**. Синхронизация по времени осуществлялась по сигналам навигационных систем ГЛОНАСС и GPS. Амплитудная калибровка интерферометра выполнялась по наиболее мощным космическим радиоисточникам: радиогалактике Лебедь А (стабильный радиоисточник) и молодым эволюционирующим

остаткам сверхновых Кассиопея А и Телец А (Крабовидная туманность) с известными значениями спектральной плотности потока радиоизлучения. Плотность потока радиоизлучения Лебеда А на частоте 150 МГц $S_{150\text{МГц}}^{\text{ЛебА}} = 10440$ Ян, Кассиопеи А на август 2006 г. $S_{150\text{МГц}}^{\text{КасА}}(2006.65) = 9200$ Ян [4] и Тельца А на то же время $S_{150\text{МГц}}^{\text{ТелА}}(2006.65) = 1480$ Ян [5] ($1 \text{ Ян} = 10^{-26} \text{ Вт/м}^2\text{Гц}$). Все три радиоисточника для данного интерферометра являются точечными, поскольку их угловые размеры (несколько минут дуги) много меньше угловой ширины интерференционного лепестка $\lambda/B \approx 2^\circ$ ($\lambda = 2 \text{ м}$).

ИЗМЕРЕНИЯ

Измерения координат КА “Космос-2414” проводились с 25.08.2006 по 29.08.2006 с использованием сигнала с его борта. Выходной сигнал мультипликативного интерферометра может быть представлен в виде

$$R(t) = A(t) \cos \Delta\varphi'(t), \quad (1)$$

где $A(t)$ — амплитуда, $\Delta\varphi' = \varphi_E - \varphi_W$ — фаза интерферометрического сигнала (где φ_E — фаза сигнала, принятого восточной антенной, φ_W — фаза сигнала, принятого западной антенной), t — время. Изменение амплитуды сигнала со временем обусловлено, в основном, изменением расстояния до КА и неточностью его сопровождения антеннами интерферометра. Зависимость фазы от времени связана с изменением разности хода лучей до антенн интерферометра из-за движения КА (доминирующий фактор) и с изменением фазового сдвига из-за влияния постоянной времени выходной интегрирующей цепочки приемника при изменении частоты интерференции. Частота дискретизации сигнала составила 10 Гц. Выполнялись сеансы приема сигнала КА как на прохождение при неподвижных антеннах (пример на рис. 1), так и в режиме его сопровождения антеннами интерферометра (пример на рис. 2; время на



Рис. 1. Сигнал $R(t)$ на выходе интерферометра в сеансе приема сигнала КА на прохождении (26.08.06)

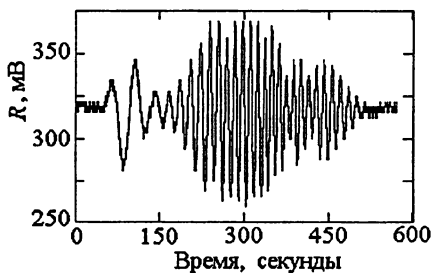


Рис. 2. Сигнал $R(t)$ на выходе интерферометра в сеансе приема сигнала КА при его сопровождении (26.08.06)

рис. 1 и 2 отсчитывается от момента начала записи t_s). Угловые координаты, дальность КА (а также скорости их изменения) и доплеровское смещение частоты Δf_D (МГц) рассчитывались в ЦУП ЦНИИмаш и передавались по электронной почте в НИРФИ. В эти же дни проводилось измерение разности электрических длин ВЧ трактов антенн радиоастрономическим методом. В качестве космических радиоисточников с известными угловыми координатами также использовались Лебедь А, Кассиопея А и Телец А. Среднее по всем измерениям значение соответствующей разности фаз сигналов восточной и западной антенн на частоте 150 МГц равно $\Delta\varphi_n^* = 70,3^\circ$ (тракт восточной антенны длиннее). При обработке данных использовались следующие значения трех проекций вектора базы в горизонтальной декартовой прямоугольной системе координат: $B_x = 2,64$ м по оси x (север–юг), $B_y = 59,98$ м по оси y (восток–запад) и $B_z = 1,74$ м по оси z (надир–зенит). Они получены ранее радиоастрономическим методом с использованием указанных выше космических радиоисточников и согласуются с величинами, измеренными с использованием навигационных систем ГЛОНАСС и GPS. Отметим, что здесь использована левая система координат (вращение от оси x к оси y происходит по часовой стрелке, если смотреть со стороны оси z).

ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Сначала была выполнена первичная обработка сигнала на выходе интерферометра в интервале времени записи $t_s \div t_f$. Первичная обработка заключалась в удалении помех и выбросов и определении нулевого уровня на каждой записи.

Далее для каждого сеанса приема сигнала с борта КА определены моменты времени t_k (где $k = 0, 1, 2, \dots, K$), соответствующие нулевым значениям интерференционного выхода. Фаза интерференционного сигнала $\Delta\varphi'$ равна в эти моменты времени $\Delta\varphi'_k = \frac{\pi}{2} + (n - k)\pi$, где $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$. С учетом разности электрических длин трактов $\Delta\varphi_{\text{н}} = \frac{f + \Delta f_D}{f} \Delta\varphi_{\text{н}}^*$ (где $f = 150$ МГц) и текущей поправки $\Delta\varphi_{\tau k}$ на постоянную времени приемника редуцированное значение фазы интерференционного сигнала, обусловленное только геометрической разностью хода лучей до антенн интерферометра, равно $\Delta\varphi_k = \Delta\varphi'_k + \Delta\varphi_{\tau k} - \Delta\varphi_{\text{н}}$. Поправка на постоянную времени приёмника $\Delta\varphi_{\tau}$ определяется из соотношения

$$\Delta\varphi_{\tau} = \text{arctg} \left(2\pi \frac{\tau}{T_{\text{инт}}} \right),$$

где $T_{\text{инт}}$ — период интерференционного сигнала. При $\tau = 0,25$ с для участков записей с наибольшей частотой интерференции (как видно из рис. 2, минимальный период ~ 12 с) эта поправка равна $7 \div 8^\circ$.

Значение целого числа n определялось путем сопоставления $\Delta\varphi_k$ с расчетными значениями разности фаз, обусловленной только геометрической разностью хода лучей до антенн интерферометра

$$\Delta\varphi_{\text{г}}(t) = \frac{2\pi}{c} (f + \Delta f_D) B \cos \theta, \quad (2)$$

где $c = 299,7925$ Мм/с, $f = 150$ МГц, θ — угол между вектором базы интерферометра \mathbf{B} и вектором $-\mathbf{k}$ (\mathbf{k} — волновой вектор принимаемого радиоизлучения), причем

$$\cos \theta = [(B_x \cos A + B_y \sin A) \cos \gamma + B_z \sin \gamma]. \quad (3)$$

В (3) видимые значения азимута A и угла места γ КА для моментов времени t_k получены путём интерполяции данных из целеуказаний, значения проекций B_x , B_y , B_z вектора базы \mathbf{B} интерферометра указаны выше. Выражение для $\cos \theta$ можно записать в другом виде, если использовать проекции \mathbf{B} в системе координат с осью z , направленной на полюс Мира: $B_M = B_x \sin \varphi + B_z \cos \varphi$, $B_N = B_y$, $B_L = -B_x \cos \varphi + B_z \sin \varphi$. Вместо (3) тогда имеем

$$\cos \theta = [(B_M \cos t_H + B_N \sin t_H) \cos \delta + B_L \sin \delta], \quad (4)$$

где $\varphi = 55^\circ 39' 18''$ — широта центра базы интерферометра, δ — видимое склонение КА, t_H — его видимый часовой угол. Далее, зависимость θ от времени в данном сеансе аппроксимировалась полиномом степени M

$$\theta(t) = \sum_{i=0}^M u_i t^i, \quad (5)$$

так, чтобы

$$F(u_0, u_1, \dots, u_M) = \sum_{k=0}^K (\Delta \varphi_{gk} - \Delta \varphi_k)^2 = \min, \quad (6)$$

где $\Delta \varphi_{gk} = \Delta \varphi_g(t_k)$. В качестве начального приближения при восстановлении траектории КА по углу θ использовались его значения, вычисленные по формуле (3), где азимут A и угол места γ — координаты КА из целеуказаний.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

На рис. 3, 4 и 5 показаны временные зависимости разности $\Delta\varphi_{gk} - \Delta\varphi_k$ при аппроксимации зависимости угловой координаты θ от времени полиномами 7-й степени для пролетов КА от 26.08.06 и 28.08.06, а на рис. 6 и 7 — зависимости $\theta(t)$ для пролетов от 28.08.06. Среднеквадратичное отклонение $\sigma =$

$$= \left(\sum_{k=0}^K (\Delta\varphi_{gk} - \Delta\varphi_k)^2 / (K + 1) \right)^{1/2}$$

измеренной разности фаз от

полученной в результате аппроксимации приведено для этих пролетов в таблице. Из нее видно, что величина σ практически не зависит от степени M аппроксимирующего полинома и составляет $(2 \div 3)^\circ$ для сеансов, в которых использовалась постоянная времени приемника $\tau = 0,25$ с. Эта погрешность складывается из неточности ($\leq 0,05$ с) определения моментов t_k , связанной с дискретизацией принимаемого сигнала, что дает ошибку $\leq 1,5^\circ$, неточности $\sim 1^\circ$ в определении текущей поправки на постоянную времени τ , влияния шумов и, возможно, слабых неотфильтрованных помех (далекие грозы и т. д.). Вклад тропосферы и ионосферы в измеряемую разность фаз $\Delta\varphi'$ для базы менее 100 м, как уже указывалось во Введении, пренебрежимо мал. Применение в 4 раза большего значения τ , как показывает эксперимент, увеличивает погрешность измерения разности фаз $\Delta\varphi$ (рис. 3 и таблица).

Таблица

Дата	$\sigma (M = 3)$	$\sigma (M = 5)$	$\sigma (M = 7)$
26.08.06	4,8°	4,8°	4,7°
28.08.06	2,5°	2,5°	2,4°
28.08.06	2,7°	2,4°	2,3°

Оценим погрешность σ_θ определения угла θ , являющегося угловой координатой КА в плоскости, содержащей вектор базы интерферометра и волновой вектор принимаемого радиоизлучения. Из (2) следует, что ошибка σ_θ , обусловленная ошибкой

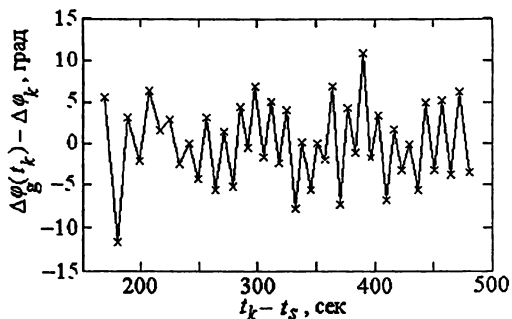


Рис. 3. Разница значений $\Delta\varphi_{gk}$ согласно (2) при аппроксимации $\theta(t)$ согласно (5) при $M = 7$ и геометрической части $\Delta\varphi_k$ измеренных значений разности фаз в зависимости от времени в сеансе от 26.08.06 (рис. 2)

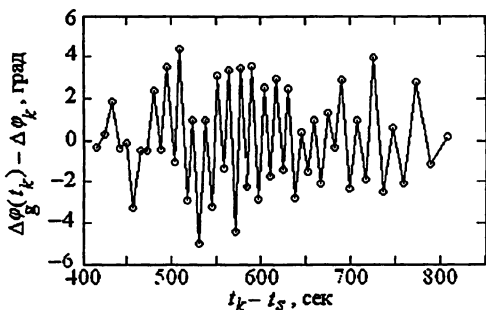


Рис. 4. Разница значений $\Delta\varphi_{gk}$ согласно (2) при аппроксимации $\theta(t)$ согласно (5) при $M = 7$ (рис. 6) и геометрической части $\Delta\varphi_k$ измеренных значений разности фаз в зависимости от времени в сеансе от 28.08.06

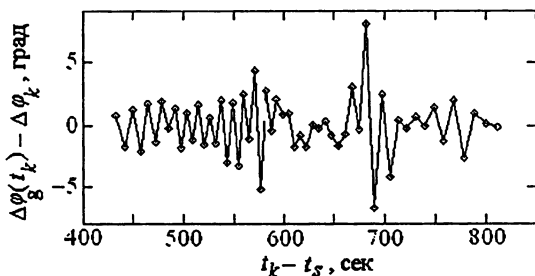


Рис. 5. То же, что и на рис. 4, но для другого пролета от 28.08.06 (см. также рис. 7)

в измерении разности фаз $\sigma_{\Delta\varphi}$, равна (пренебрегаем Δf_D по сравнению с f , поскольку $|\Delta f_D| < 0,002$ МГц, что много меньше f)

$$\sigma_{\theta} = \frac{c}{2\pi f B \sin \theta} \sigma_{\Delta\varphi}. \quad (7)$$

Подставляя в (7) $\sigma_{\Delta\varphi} = 2,5''$, $\theta = 60^\circ$, (рис. 6) или $\theta = 90^\circ$ (рис. 7), получим $\sigma_{\theta} \approx 50''$. Как видно из (7), с уменьшением величины проекции $B \sin \theta$ вектора базы на плоскость, ортогональную волновому вектору, величина σ_{θ} возрастает.

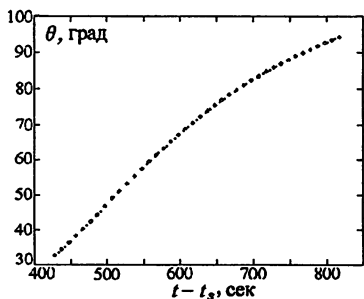


Рис. 6. Зависимость угла θ от времени согласно аппроксимации результатов измерений полиномом седьмой степени (точки) и согласно целеуказанию (ромбики) для пролета от 28.08.06 (см. рис. 4)

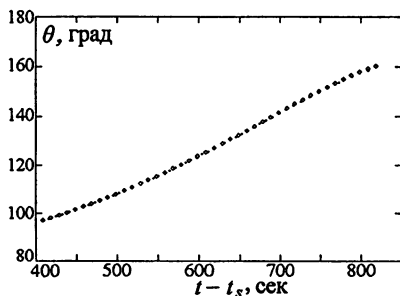


Рис. 7. Зависимость угла θ от времени согласно аппроксимации результатов измерений полиномом седьмой степени (точки) и согласно целеуказанию (ромбики) для другого пролета от 28.08.06 (см. рис. 5)

В данной работе измерена угловая координата КА в плоскости, содержащей вектор базы интерферометра (это полярный угол в системе координат с осью z , направленной вдоль \mathbf{B}). Что же касается азимутального угла (координаты в плоскости, ортогональной вектору базы интерферометра), то здесь точность измерения определяется шириной главного луча антенн интерферометра. Для точного определения обеих угловых координат КА (в горизонтальной системе координат это азимут и угол места, в экваториальной системе координат прямое восхождение

или часовой угол и склонение) необходимо проводить измерения одновременно на двух интерферометрах с ортогональными векторами баз. Увеличение частоты до 1600 МГц позволит получить, даже при той же базе интерферометра и той же точности измерения разности фаз, погрешность $\sim 5''$ определения угловых координат КА.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненный эксперимент по измерению угловых координат КА “Космос-2414” с использованием одноканального корреляционного интерферометра с базой ≈ 60 м на волне 2 м показал возможность их определения с точностью около одной минуты дуги по одной координате. Дальнейшее развитие данной установки, включающее добавление ортогональной базы, повышение частоты излучения, улучшение чувствительности и помехозащищенности аппаратуры, позволит измерять обе угловые координаты КА, существенно (в десятки раз) повысить точность их измерения и в сочетании с лазерно-дальномерными измерениями определять траекторию КА в реальном времени.

Авторы благодарят Н. А. Дугина и М. Б. Нечаеву за помощь в подготовке измерений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дугин Н. А., Разин В. А., Смышляева Г. Г. О прикладных исследованиях с малобазовыми радиоинтерферометрами // Космонавтика и ракетостроение. 2002. №4 (29). С. 116–124.
2. Дугин Н. А., Кузнецова И. П., Разин В. А., Смышляева Г. Г. О возможности применения двухэлементного радиоинтерферометра для траекторных измерений // Космонавтика и ракетостроение. 2004. №4 (41). С. 147–160.
3. Томпсон А. Р., Моран Дж. М., Свенсон Дж. У. Интерферометрия и синтез в радиоастрономии. — М.: Физматлит, 2003.

4. Виняйкин Е. Н. Вековое уменьшение плотности потока радиоизлучения Кассиопеи А по многолетним наблюдениям. Наблюдения на частотах 38, 81,5 и 151,5 МГц // *Астрономический журнал*. 2006. Т. 83, № 2. С. 168–176.
5. Виняйкин Е. Н. Эволюция радиоизлучения Крабовидной туманности по многолетним наблюдениям на частотах 927 и 151,5 МГц // *Астрономический журнал*. 2007. Т. 84, № 7. С. 634–641.