

УДК 621.396

С.В. Козелков, А.А. Моргун, Д.П. Пашков

Национальная академия обороны Украины, Киев

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ТРАЕКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ДЛЯ БАЛЛИСТИКО-НАВИГАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ УПРАВЛЕНИЯ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ СРЕДНЕГО И ДАЛЬНОГО КОСМОСА

Предлагается метод траекторных измерений для баллистико-навигационного обеспечения управления космическими аппаратами среднего и дальнего космоса на основе использования радиоинтерферометрической системы.

траекторные измерения, радиоинтерферометрическая система, космический аппарат, баллистико-навигационное обеспечение

Введение

При разработке космических систем высокой сложности встает ряд принципиальных вопросов связанных с баллистико-навигационным обеспечением управления космическими аппаратами (КА), решение которых определяет возможности системы [1]. Учитывая особенности решения навигационной задачи при управлении КА в условиях ограниченных географических возможностей Украины (размещение только одного наземного радиотехнического комплекса (РТК)), метод траекторных измерений КА должен обеспечить размещение пунктов пространственно-временных измерений КА, геометрическую интерпретацию этих измерений, анализ методических особенностей обработки полученной при этом информации, а также выбор средств радиотехнической реализации этих измерений.

Анализ литературы [1 – 3] показал, что для измерения текущих навигационных параметров (ИТНП) КА можно воспользоваться радиоинтерферометрической системой. Однако при разработке траекторной радиоинтерферометрической системы принципиальным является определение метода траекторных измерений КА; учет особенности сбора и обработки ИТНП КА; обеспечение синхронизации удаленных шкал времени в приемно-измерительных пунктах радиоинтерферометра. Поэтому **целью статьи** является разработка метода траекторных измерений для баллистико-навигационного обеспечения управления космическими аппаратами.

Результаты исследований

Основу предлагаемого метода траекторных измерений КА представляют радиоинтерферометрические измерения со сверхдлинной базой (РСДБ - измерения). При этом, в качестве базы измерений используется расстояние между наземным РТК и бортовым РТК опорного КА, постоянно находящегося в зоне видимости наземного РТК. Реализация бортового РТК может представлять собою систему

КА, расположенных на высокоэллиптической орбите ($H \geq 200000$ км) или систему КА, расположенных на геостационарной орбите ($H = 36000$ км). Учитывая относительную простоту технической реализации (в частности, для синхронизации радиосигналов [3]), представляется целесообразным выбрать размещение бортового РТК системы РСДБ-измерений на геостационарной орбите КА. Геометрическая интерпретация предлагаемого метода траекторных измерений представляет собой двойную разность времени распространения радиосигналов от КА, опорного КА и опорного КИ (рис. 1).

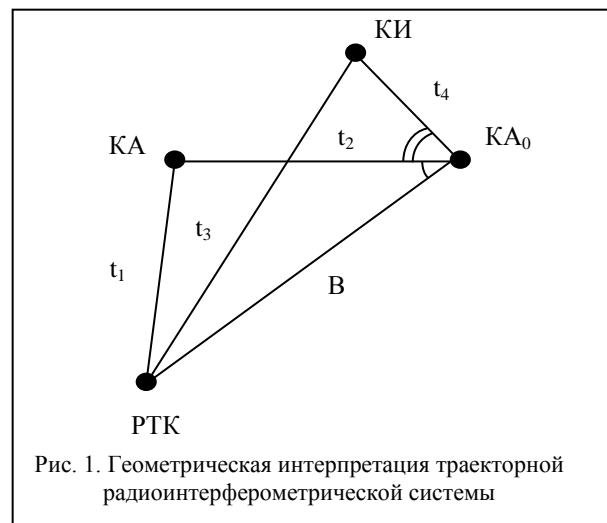


Рис. 1. Геометрическая интерпретация траекторной радиоинтерферометрической системы

РСДБ-измерения можно представить в виде

$$JF_{КА} - JF_{КА0} = (t_1 - t_2) - (t_3 - t_4),$$

где $JF_{КА} = t_1 - t_2$ – разность времени распространения радиосигнала от наземного РТК до измеряемого КА и от измеряемого КА до опорного КА; $t_1 - t_2 = B \cos \alpha / c$; α – угол между базой и направлением на измеряемый КА; c – скорость света, B – база измерений; $JF_{КА0} = t_3 - t_4$ – разность времени распространения радиосигнала от наземного РТК до опорного КИ и от опорного КИ до опорного КА; $t_3 - t_4 = B \cos(\alpha - \alpha_1) / c$; α_1 – угол между направ-

лением от опорного КА до измеряемого КА и направлением от опорного КА до опорного КИ.

С достаточной степенью точности для JF-измерений будет справедливо,

$$JF = -\frac{B}{c} \sin \alpha \alpha_1. \quad (1)$$

Тогда соотношение для определения углового наклона КА относительно опорного КА (в проекции на базу) по измерению JF будет иметь вид

$$\alpha_1 = -cJF/(B \sin \alpha). \quad (2)$$

Из выражения (2) видно, что ошибка измерения угла α_1 пропорционально зависит от ошибки JF измерения и при заданной его точности будет тем меньше, чем больше величина $B \sin \alpha$. Для получения лучших точностных характеристик траекторных измерений КА желательно, чтобы соответственно длина B и угол α были как можно больше.

Учитывая место размещения опорного КА на геостационарной орбите, в предложенном методе траекторных измерений достигается база измерения значительно превосходящая максимально возможную базу измерения при использовании в РСДБ-измерениях только наземных РТК.

При этом, если траекторные измерения производить с одной базы, то область локализации КА на небесной сфере представляется полосой, ширина которой определяется ошибкой α_1 (вдоль расположения проекции базы). При использовании двух пересекающихся баз область локализации КА в качестве второй базы может быть выбрано расстояние от наземного РТК до опорного КИ или опорного КА. Локализация объекта измерения в этом случае определяется пересечением описанных выше полос. Причем если обозначить через α'_1 – ошибки измерения углового положения КА на первой базе, а через α_2 – ошибки измерения углового положения КА на второй базе, и через α_3 – угол пересечения направлений баз, то максимальные расстояния между границами области локализации, отсчитываемыми по двум ортогональным направлениям (условно считая направление α_1 – первым) будут определяться значениями величины: по первому – α_1 ; по второму – $[\alpha_1 + \alpha_1 \cos \alpha_3] / \sin \alpha_3$.

Минимальная неопределенность области локализации КА по обоим направлениям будет в случае ортогональности направлений баз, т.е. $\alpha_3 = \pi/2$.

Метод РСДБ позволяет произвести измерения углового положения объекта на небесной сфере с двух пересекающихся баз. В случае измерения третьей координаты – дальности до КА, получается весьма ценное для практики эксплуатации КС полное пространственное определение КА. В предельном варианте, использование даже двух таких троек измерений позволяет решить навигационную задачу управления КА.

Основываясь на РСДБ наблюдениях излучаемого КА сигнала, можно измерить его кросс-корреля-

ционную функцию и оценить ее основные параметры, необходимые для решения навигационной задачи [4, 5]: фазу интерференции – $\Phi(t, f)$; частоту интерференции – $f_u = \frac{1}{2\pi} \frac{d\Phi}{dt}$; групповую геометриче-

скую задержку – $\tau_q = \frac{1}{2\pi} \frac{d\Phi}{df}$, где t – время, f – частота входного сигнала.

Рассмотрим случай РСДБ измерений, при котором в диаграмму направленности двухэлементного интерферометра попадает только один точечный источник.

Формальная ошибка измерения групповой геометрической задержки зависит от среднеквадратической синтезированной полосы частот ΔV_e и отношения сигнал/шум $h_{кр}$ на выходе коррелятора

$$\sigma_\tau = \frac{1}{2\pi \Delta V_e h_{кр}}, \quad (3)$$

где $\Delta V_e = \sqrt{\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k V_i^2}$ – среднеквадратическое значение полосы частот для k -канального синтеза полосы сигнала на частотах V_i . Для одноканального приема $\Delta V_e = \frac{\Delta V}{\sqrt{12}}$.

Отношение сигнал-шум на выходе коррелятора в общем виде определяется известным, например из [6 – 8], соотношением, в котором числитель определяет сигнал, а знаменатель – шум

$$h_{кр} = \frac{\sqrt{T_{AM} T_{AN}} \int_{-\infty}^{\infty} H_m(v) H_n^*(v) dv}{\sqrt{(T_{AM} + T_{SM})(T_{AN} + T_{SN}) + T_{AM} T_{AN}} \cdot M}, \quad (4)$$

где $M = \sqrt{2\Delta V_{LF} \int_{-\infty}^{\infty} |H_m(v)|^2 |H_n(v)|^2 dv^2}$; T_{AM}, T_{AN} – эквивалентные шумовые температуры сигнала источника на антеннах m и n ; T_{SM}, T_{SN} – эквивалентные шумовые температуры антенно-приемного устройства (АПУ); $H_m(v), H_n(v)$ – частотные характеристики фильтров промежуточной частоты; ΔV_{LF} – ширина полосы частот низкочастотного фильтра на выходе коррелятора.

При $T_A \ll T_S$ и $2\Delta V_{LF} = 1/\tau_a$ получим

$$h_{кр} = \sqrt{\frac{T_{AM} T_{AN}}{T_{SM} T_{SN}} 2\Delta V_{JF} \tau_a},$$

где ΔV_{JF} – ширина $H_m(v)$ и $H_n(v)$.

Для случая РСДБ наблюдения КА в выражениях (3) и (4) величины ΔV_e и $h_{кр}$ связаны с излучаемым КА квазидетерминированным сигналом: монохроматическим, периодическим или псевдошумовым.

В общем виде задача РСДБ измерений КА аналогична задаче спектральных радиоинтерферометрических измерений, поскольку спектр мощности сигнала КА ограничен и не имеет постоянной спек-

тральной плотности как в случае КИ со сплошным равномерным спектром в рабочем диапазоне частот. В связи с этим, методика измерения частоты интерференции и геометрической групповой задержки для КА нуждается в уточнении, поскольку фазовый спектр комплексного кросс корреляционного спектра, по наклону которого определяется групповая задержка, не может быть просто аппроксимирован прямой линией и является сложной функцией частоты.

Важным новым фактором, влияющим на точность измерений, является стабильность бортового ОГ, которая, как правило, на 2 – 3 порядка хуже стабильности наземных водородных генераторов [5, 6]. Изменение частоты бортового генератора со временем ограничивают применение частотно-интерференционного метода РСДБ измерений.

Зависимости отношений сигнал-шум на выходе коррелятора h_{KP} и выходе антенно-фидерного тракта КА h_{KA} для одинаковых антенн и приемных систем будут определяться выражениями [7]:

$$h_{KP} = \left(\frac{\sqrt{\Lambda}}{\sqrt{\Lambda_1 \Lambda_2}} \right) / \left(\sqrt{2(N\Lambda + 1) + \frac{1}{N\Lambda}} \right) \sqrt{2\Delta V_{JF} \tau_a}; \quad (5)$$

$$h_{KA} = \left(\sqrt{\Lambda} / \sqrt{2 + \frac{1}{N\Lambda}} \right) \sqrt{2\Delta V_{JF} \tau_a},$$

где $\Lambda_1 = T_{am} / T_{sn}$, $\Lambda_2 = T_{an} / T_{sm}$.

Для случая $\Delta f_p = \Delta JF, N=1$ формулы принимают следующий вид

$$h_{KP} = \sqrt{2\Delta V_{JF} \tau_a} / \sqrt{2(1 + \frac{1}{\Lambda}) + \frac{1}{\Lambda^2}}; \quad (6)$$

$$h_{KA} = \sqrt{2\Delta V_{JF} \tau_a} / \sqrt{2 + \frac{1}{\Lambda^2}}. \quad (7)$$

Для сильного сигнала $\Lambda \gg 1$:

$$h_{KP} = \sqrt{\Delta V_{JF} \tau_a}; \quad h_{KA} = \sqrt{N\Lambda_1 \Lambda_2} \sqrt{2\Delta V_{JF} \tau_a}.$$

В случае слабого сигнала, $\Lambda \ll 1$, получаем приближенно равные оценки отношения сигнал-шум:

$$h_{KP} \approx \sqrt{2\Delta V_{JF} \tau_a}; \quad h_{KA} \approx \Lambda \sqrt{2\Delta V_{JF} \tau_a}. \quad (8)$$

На основе использования МНК можно оценить групповую задержку путем подбора прямой линии по точкам фазового спектра взаимной корреляционной функции.

Ошибка задержки определяется выражением (3) для случая одиночной полосы ($\Delta V_i = \Delta f_{\Sigma} / \sqrt{2}$)

$$\sigma_{\tau} = \sqrt{3} / (\pi h_{KP} \Delta f_{\Sigma}). \quad (9)$$

Если спектр сигнала КА имеет K участков в полосе рабочих частот, например, центральную частоту и несколько поднесущих V_1 , имеется возможность произвести синтез полосы частот, аналогичный технологии Mark-3 и Mark-4 [3]. В этом случае ошибка оценки задержки принимает вид

$$\sigma_{\tau} = \sqrt{3} / \left(\pi h_{KP} \sqrt{\frac{1}{K} \sum_{i=1}^K V_1^2} \right), \quad (10)$$

где $h_{KP} = \sqrt{\sum_{i=1}^K h_{KPi}^2}$ – среднеквадратическое отно-

шение сигнал-шум в суммарной энергетической полосе частот сигнала КА.

Сравнивая формулы для отношения сигнал-шум для случаев РСДБ наблюдений КА и КИ на основе использования выражений (5) и (6) можно определить отношение этих величин при одинаковых значениях Λ

$$\mu = \frac{h_{KA}}{h_{KI}} = \sqrt{\frac{2(N\Lambda)^2}{2N\Lambda + 1} + 1}$$

Из анализа этой формулы видно, что при $N\Lambda = 1$ $\mu = \sqrt{5/3}$, т.е. имеется методический выигрыш в отношении сигнал-шум.

При $N\Lambda \ll 1$ – $\mu \approx 1 + (N\Lambda)^2$.

При $N\Lambda \gg 1$ выигрыш $\mu \approx \sqrt{N\Lambda}$ значительный. Поэтому согласованная фильтрация сигнала с КА с помощью корреляционного спектрального анализа целесообразна в этом случае.

Если отдельные участки сигнала Δf_{Σ} равны между собой и $T_{A\Sigma}(V_i) = \text{const}$, то $h_{KP} = h_{KPi} \sqrt{K}$ и (10) принимает вид [6]

$$\sigma_{\tau} = 1 / (2\pi \Delta V_i h_{KPi} \sqrt{K}). \quad (11)$$

Аналогично, используя МНК, можно оценить частоту интерференции путем подбора прямой линии по точкам, равномерно разнесенным по времени измерения фазы. При этом формальная ошибка измерения оценки определяется выражением [9]

$$\sigma_f = 1 / \left(2\pi h_{KPi} \sqrt{\sum_{i=1}^K t_i^2} \right). \quad (12)$$

$$\text{Поскольку } \sum_{i=1}^K t_i^2 \cong \frac{1}{T} \int_{-\tau_0/2}^{\tau_0/2} t^2 dt = \frac{\tau_a^3}{12T} = \frac{K_t \tau_a^3}{12},$$

где T – интервал измерений, получим [8]

$$\sigma_f = \frac{\sqrt{3}}{\pi h_{KPi} \tau_a \sqrt{K_t}}.$$

Для случая квазидетерминированного сигнала в выражениях σ_{τ} и σ_f следует использовать значение h_{KP} в соответствии с формулой (5).

Для дифференциального метода наблюдений КА на фоне КИ, находящихся на близком угловом расстоянии, измеряемыми величинами являются разности частот интерференции и групповых задержек.

Для достижения наивысшей точности угловых измерений, основанных на использовании опорных квазаров, необходимо выполнить условия:

$$\sigma_{\tau_{KI}}^2 \ll \sigma_{\tau_{KA}}^2; \quad \sigma_{f_{KI}}^2 \ll \sigma_{f_{KA}}^2. \quad (13)$$

При этом ошибки дифференциальных измерений будут определяться только ошибками измерений по КА, т.е. [9]

$$\sigma_{\tau_{KI}}^2 \approx \sigma_{\tau_{KA}}^2; \quad \sigma_{f_{KI}}^2 \approx \sigma_{f_{KA}}^2.$$

Необходимо отметить, что в случае РСДБ измерений квазидетерминированных периодических сигналов нарушение условия выбора времени интегрирования $\tau_a = nT_{KA}$, где T_{KA} – период повторения сигнала КА, будет приводить к флуктуациям сигнала

ла на выходе коррелятора, что увеличит шумовую температуру входных радиоустройств и снизит помехоустойчивость РТК.

В тех же случаях, когда период повторения сигнала много больше периода наблюдения (например, для Р-кода КНС ГЛОНАСС и GPS) или псевдослучайная последовательность не является повторяющейся (например, сигнал НКИ), необходимо применять нормировку кроссспектра мощности, используя данные автокорреляционного спектра, как для случая спектральных РСДБ наблюдений [5]. При большом отношении сигнал-шум $h_{\text{КР}}$ может быть получен значительный выигрыш в кроссспектре корреляции, нормированном на автокорреляционный спектр [8, 9].

Выражение (10) определяет формальную ошибку измерения задержки с использованием синтеза полосы сигнала КА. Простой анализ данного выражения позволяет сделать заключение, что при заданных требованиях на величину σ_{τ} можно сформировать широкий класс сигналов с борта КА, которые бы в необходимых соотношениях интенсивности и формы спектра удовлетворяли бы заданным условиям точности. Таким образом любые сигналы, излучаемые КА могут быть использованы для РСДБ измерений. Последовательная смена режимов модуляции бортового передатчика потребует адаптивного согласованного приема и обработки, которые позволяют при необходимости вести непрерывное сопровождение КА. Тогда не требуется формирование специализированных бортовых сигналов для проведения сеансов навигационных РСДБ измерений.

Для построения траекторного радиоинтерферометра особое значение имеет выбор используемых для измерений РТК и, в частности, их антенных систем. Это обстоятельство обусловлено тем, что измеряются не только координатно-пространственные характеристики КА, а и характеристики опорных КИ.

Для повышения отношения сигнал-шум необходимо использовать РТК с антеннами большого диаметра. Однако в предлагаемой траекторной радиоинтерферометрической системе один из пунктов измерения расположен на борту опорного КА. Поэтому увеличение размеров антенны этого РТК является сложной и дорогостоящей задачей. В этой связи представляется целесообразным увеличивать диаметр антенны наземных РТК. Особый интерес при этом представляют РТК, которые существуют и могут быть задействованы в процессе управления КА. Анализ существующих технических средств [7] показывает, что предпочтение при выборе для траекторной радиоинтерферометрической системы является антенна РТ-70. Антенна РТ-70 [6] является полноповоротная типа Грегори с квазипараболическим основным зеркалом 70 м и сектором обзора $0 - 360^\circ$ по азимуту и $6 - 90^\circ$ по углу места.

Как и следовало ожидать, для данной антенны предельные параметры радиоастрономических величин достаточно хороши. Определим также степень согласованности наземного РТК по простран-

ственному разрешению и разрешению по чувствительности. Оценку проведем для волны 5 см, на которой реализуются лучшие параметры системы [7, 8]. Число источников, разрешаемых наземным РТК на полусфере, приближенно оценивается как [8, 9]

$$N(r) = 0,1 \times \frac{2\pi}{\Theta^2} = 10^6.$$

Анализ имеющихся данных по статистике источников, их спектрам и моделям Вселенной показывает, что число источников с плотностями потоков $5 - 20$ мЯн не превышает величин [9] $N(d) = 10^7 \div 10^6$, т.е. близко к значению $N(r)$, что говорит о практически оптимальном согласовании инструмента по чувствительности и разрешающей способности. Некоторый избыток чувствительности не вреден, т.к. для исследований, например, линий или пульсаров эффект “спутывания” не столь опасен в связи с появлением дополнительных критериев различения – частотного и временного.

Выводы

Таким образом, выбор антенны РТ-70 для наземного РТК траекторной радиоинтерферометрической системы позволяет использовать в качестве опорных объектов галактические и внегалактические КИ и тем более обеспечит прием и обработку сигналов неконтролируемых излучений БА для получения траекторной и идентификационной информации о КА.

Список литературы

1. *Космические траекторные измерения. Радиотехнические методы измерений и математическая обработка данных / Агаджанов П.А. и др. – М.: Сов. радио, 1964. - 504 с.*
2. *Точность измерения параметров движения космических аппаратов радиотехническими методами / С.Д. Сильвестров и др. – М.: Сов. радио, 1970. – 320 с.*
3. *Дитц Р.Х. Система связи и слежения космической станции // ТИИЭР. – 1987. – Т. 75, № 3. – С. 118-132.*
4. *Козелков С.В. Применение планетного радиолокатора для задач навигации космических аппаратов // Системы обработки информации. – Х.: НАНУ, ПАНМ, ХВУ, 1999. – Вып. 1 (5). – С. 139-142.*
5. *Смоляк С.А., Титаренко Б.П. Устойчивые методы оценивания. – М.: Статистика, 1980. – 208 с.*
6. *Губанов В.С., Зимовский В.Ф. Возможности применения радиоинтерферометрической техники в дуплексном методе сличения часов по каналу спутниковой связи: Препринт. – Л.: САО, 1988. – 57 с.*
7. *Козелков С.В., Нюкин Н.В., Пащков Д.П. Анализ возможностей построения БНОКА // Зб. наук. пр. ХВУ. – Х.: ХВУ, 1999. – Вып. 3 (25). – С. 64-67.*
8. *Гуревич Е.Л. Анализ сигналов для передачи шкалы времени по спутниковому каналу связи // Радиоэлектроника. – 1993. – № 7. – С. 69-72.*
9. *Мудров В.И., Кушко В.Л. Методы обработки измерений. – М.: Сов. радио, 1976. – 192 с.*

Поступила в редакцию 6.07.2006

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Л.Ф. Купченко, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

