

## ВЫСОКОТОЧНЫЙ МЕТОД ОПЕРАТИВНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ УГЛОВЫХ КООРДИНАТ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

к.т.н. Б.А. Чумак, к.т.н. И.Г. Лысаченко,  
к.т.н. В.М. Попов, к.т.н. А.В. Дремлюга  
(представил д.т.н., проф. Е.Л. Казаков)

*Рассмотрен вариант использования пространственно-временных сигналов со сложной структурой в системах измерения угловых координат космических аппаратов. Проведен сравнительный анализ точности и оперативности предложенного и известных методов определения угловых координат этих объектов при их первичном поиске. Показаны выигрыши предложенного метода по сравнению с известными.*

**Введение.** Повышение оперативности поиска космических аппаратов (КА) в пространстве при одновременном обеспечении требуемых точностей определения их углового положения является актуальной задачей в условиях применения однопунктной технологии управления. Необходимость решения данной задачи обусловлена ограничением времени нахождения объекта в зоне видимости наземных средств.

**Анализ литературы.** Известно [1, 2], что наиболее точными из применяемых в настоящее время являются фазовые методы измерения угловых координат КА. Однако точность этих методов зависит от многих факторов, например, от точности геодезической привязки антенн фазометра, стабильность частоты передатчика, ошибки распространения радиоволн, ошибки измерения разности фаз. Кроме того, фазовый пеленгатор – сложная система с большим числом антенн и приемных систем, составляющих единый комплекс. В целом, ошибки измерения углов, обусловленные действием шумов, пропорциональны апертуре антенны [1, 3], а наилучшая точность измерения углов обеспечивается при оптимальной обработке принимаемого сигнала.

В практике угломерных определений также используются амплитудные методы, реализуемые, в частности, в моноимпульсных суммарно-разностных пеленгаторах. Для них характерны ошибки, обусловленные слабой пеленгационной чувствительностью и сильной зависимостью от энергетических характеристик сигнала. В процессе угловых измерений используется равносигнальный метод. Необходимо учитывать, что в

таких пеленгаторах для обеспечения высоких точностей необходимо использовать достаточно большие антенны с диаметром зеркала порядка 20 – 30 метров, что приводит к усложнению конструкции антенной системы. Оперативность получения измерительной информации такими системами низка.

Перспективным направлением совершенствования радиотехнических систем измерения параметров движения является переход к многоканальному принципу построения, позволяющему существенно расширить их возможности при измерениях в сложной сигнально-помеховой и динамической обстановке. Поэтому представляется интересным применение многоканальных радиолокационных станций со сложными сигналами, обладающими специфическими пространственно-временными свойствами [4 – 7]. Однако необходимо отметить, что в данных работах рассматривались вопросы построения систем измерения угловых координат воздушных объектов. Такой подход уже сейчас широко реализуется на основе использования фазированных антенных решеток (ФАР). В работах [8 – 10] рассмотрены варианты построения систем ускоренного поиска КА в пространстве с одновременным получением информации об его угловом положении. Результаты исследований, которые приведены в работах [8 – 10], носят несистематизированный характер.

**Целью статьи** является разработка метода измерения угловых координат КА с применением сложных сигналов, а также обоснование возможности получения выигрышей в оперативности поиска и точности измерения угловых координат КА за счет использования нового метода обработки сигналов со сложной структурой.

Для реализации метода в секторе обзора с помощью фазированных антенных решеток излучаются синхронизированные по времени и разные по структуре и по частоте фазоманипулированные широкополосные шумоподобные сигналы (ФМн ШШС). Прием отраженного сигнала осуществляется антенной, способной принимать отраженный сигнал в довольно широком секторе обзора. В качестве суммарного периода выбрана продолжительность сигнала, равная произведению количества элементарных символов каждой из трех модулирующих псевдослучайных последовательностей (ПСП) и длительности одного элементарного символа

$$T_{\Sigma} = \tau_0 \cdot N_1 \cdot N_2 \cdot N_3, \quad (1)$$

где  $T_{\Sigma}$  – суммарный период сигнала;  $\tau_0$  – длительность элементарного символа.

В качестве  $N_1, N_2, N_3$  выбраны взаимно простые числа. В данном конкретном случае:  $N_1 = 7$ ,  $N_2 = 15$ ,  $N_3 = 31$ . Эти числа отвечают количеству символов в ПСП, сформированных, соответственно, 3-х, 4-х и 5-разрядными генераторами ПСП. Если совпадает по времени начало формирования этих последовательностей, то следующее их начало (при одинаковой продолжительности элементарных символов) совпадет через  $7 \cdot 15 \cdot 31 = 3255$  элементарных символов в каждом сигнале. Отметим, что выделение таких ПСП легко осуществлять с помощью согласованных фильтров.

Если проанализировать, сколько поместится в «суммарном» периоде каждой из ПСП, то окажется, что 7-элементных ПСП будет  $15 \cdot 31 = 465$ , 15-элементных –  $7 \cdot 31 = 217$ , и 31-элементных –  $7 \cdot 15 = 105$ . При этом между каждым из 105 окончаний 31-элементной ПСП и ближайшими предыдущими окончаниями 7-и и 15-элементных ПСП будет содержаться строго определенное количество элементарных символов ПСП. Причем сочетание этого количества для каждого из 105 случаев будет разным.

Таким образом, если определенный сектор пространства (для примера положим сектор равным  $5^\circ$ ) просматривать при равномерном движении диаграммы направленности (ДН) за время, равное  $T_{п\Sigma}$ , то в этом секторе можно выделить 105 элементарных зон, которые можно различить.

Рассмотрим для наглядности пример. Обычно длину элементарного символа ПСП выбирают в пределах 1 мкс. Пусть угловая скорость движения ДН антенны ( $\Omega$ ) – постоянна, и такова, что за время  $T_{п\Sigma}$  (в данном случае, равное  $10^{-6} \cdot 7 \cdot 15 \cdot 31 = 3255$  мкс) просматривается сектор от 0 до  $5^\circ$ . При этом в первую микросекунду будет излучен первый элементарный символ сигнала, в другую – второй и т.д. до 3255-го элементарного символа, который отвечает 105-и ПСП по 31-му символу. Предположим, что на приемную антенну поступила 45-я последовательность. Это значит, что последний элементарный символ этой ПСП был излучен в момент времени от начала движения ДН, равный  $t_{изл} = \tau_0 \cdot 31 \cdot 45 = 1,395$  мс. В таком случае объект, который отразил этот символ, находится под углом, равным:  $\alpha = \Omega \cdot t_{изл} = 2,142857^\circ$ . Очевидно, что точность измерения угловой координаты объекта для данного примера будет определяться длительностью элементарного символа ПСП и составит:  $5^\circ / 3255 \approx 5,5''$ . В предлагаемом методе обзор пространства

осуществляется по углу места – от 5 до 90°, по азимуту – от 0 до 360°. При этом луч осуществляет последовательный обзор согласно рис. 1.

Единичный сдвиг диаграммы направленности по азимуту будет определяться ее шириной. Для того чтобы разделить сектора обзора (по 5°) при движении лепестка по углу места, необходимо сформировать грубую шкалу измерений. Это осуществляется с помощью фиксации моментов совпадения начал всех трех сформированных

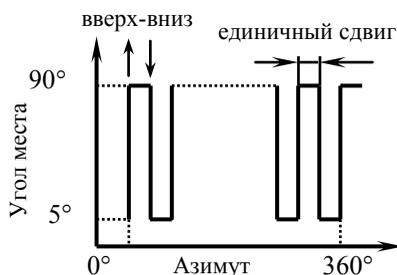


Рис. 1. Схема движения луча ДН

ПСП. Важно, чтобы максимальная дальность до объекта была не больше величины:  $R_{\max} < c \cdot T_{\text{п}\Sigma} / 2$ . В противном случае будет наблюдаться неоднозначность измерения углов. Для данного случая

$$R_{\max} < 3 \cdot 10^5 \cdot 3,255 \cdot 10^{-3} / 2 = 488,25 \text{ км.}$$

За период движения ДН по углу места будет излучено  $(90^\circ - 5^\circ) / 5^\circ = 17$  суммарных периодов сигнала. Необходимо также фиксировать моменты начала движения ДН вверх и вниз, т.е. формировать еще одну грубую шкалу, при этом первую грубую шкалу целесообразно назвать промежуточной.

Информация об азимуте объекта будет заложена в величине единичного сдвига по азимуту и их количеству к моменту прихода отраженного от объекта сигнала. Кроме этого при данном методе появляется возможность довольно точно и однозначно в пределах  $R_{\max}$  измерять дальность до объекта.

При этом возможны два варианта (рис. 2). Если счетчик дальности каждый раз начинает счет от нуля в моменты совпадения начала всех трех ПСП (то есть в моменты  $t_{01}$  и  $t_{02}$ ), то, очевидно, что в первом случае временная задержка между излученной и соответствующей ПСП (помечена серым), номер которой  $k$ , будет равняться

$$\tau_1 = t_{\text{ост1}} - t_{\text{изл}} = t_{\text{сч1}} - 31 \cdot \tau_0 \cdot k, \quad (2)$$

а для второго

$$\tau_2 = t_{\text{ост2}} - t_{\text{изл}} = t_{\text{сч2}} + T_{\text{п}\Sigma} - 31 \cdot \tau_0 \cdot k, \quad (3)$$

где  $t_{\text{сч1}} = t_{\text{ост1}}$ ,  $t_{\text{сч2}} = t_{\text{ост2}}$  – интервалы времени, которые отвечают показаниям счетчика дальности в первом и втором случае.

Повышение эффективности поиска и измерения углового положения достигается за счет того, что появляется возможность выделять элементарные секторы. Точность зависит от длительности элементарного символа ПСП. При этом значительно повышается оперативность определения угловых координат за счет того, что исключается требование по обеспечению времени облучения  $T_{обл} = 2R/c$ . Кроме того, возможно получение информации о дальности до объекта.

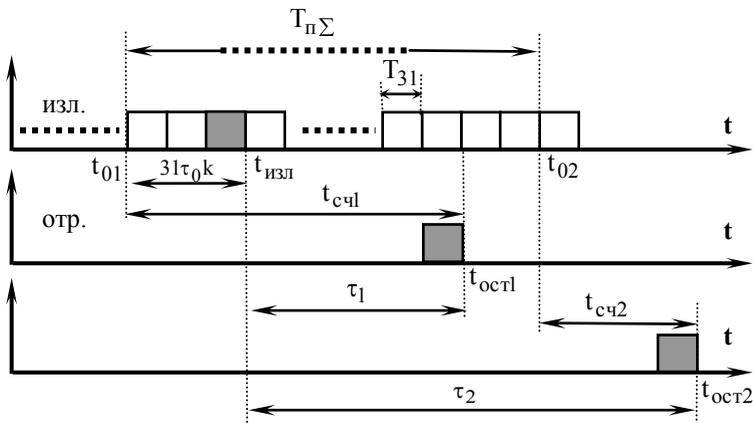


Рис. 2. Варианты задержки сигнала при измерении дальности

Рассмотрим физическую картинку применения метода для измерения угловых координат (см. рис. 3).

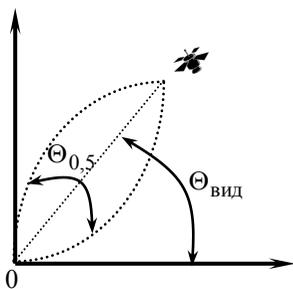


Рис. 3. Физическая картинка применения метода

Положим для определенности, что максимум диаграммы направленности сканирует в пространстве с угловой скоростью

$$\Omega = \frac{2\pi}{T}. \quad (4)$$

При попадании объекта в луч диаграммы направленности в приемном устройстве формируется короткий по времени сигнал, с максимумом амплитуды в момент совпадения оптической оси антенны с направлением на объект. Описание физики измерений позволяет констатировать, что при равномерной скорости обзора  $\Omega$  и непрерывном характере сигнала существует аналогия между методом измерения угловых координат по максимуму сигнала и импульсным методом измерения дальности.

Действительно, если считать, что при  $\Theta_{\text{вид}} = 0$  (рис. 3, 4) начинается отсчет времени, т.е.  $t = 0$ , то моменту максимального приема сигнала будет соответствовать интервал времени

$$t_{\text{max}} = T \frac{\Theta_{\text{вид}}}{2\pi}. \quad (5)$$

При этом длительность “импульса” будет составлять величину

$$\tau_{\text{имп}} = T \frac{\Theta_{05}}{2\pi}. \quad (6)$$

На рис. 5 показано, как реализуется данный метод, где серым цветом показана группа элементарных символов 31-элементной ПСП. Очевидно, что моменту времени  $t_{\text{max}}$  будет соответствовать середина принятого сигнала. Эту середину можно найти, учитывая методику определения времени излучения соответствующих ПСП, с учетом их количества, принятого за время  $\tau_{\text{имп}}$ .

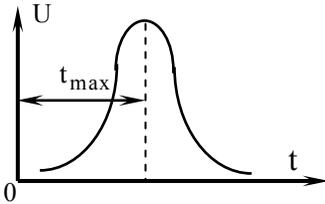


Рис. 4. Момент приема 31-элементной ПСП

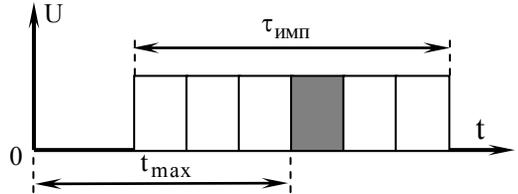


Рис. 5. Положение 31-элементной ПСП при  $\Theta_{\text{ка}} = \Theta_{\text{вид}}$  на оси времени (рис. 3)

Ошибка определения угловой координаты, исходя из выражения (5), будет иметь вид

$$\sigma_{\Theta_{\text{вид}}} = \frac{2\pi}{T} \sigma_t. \quad (7)$$

Оценим выигрыш в точности системы при реализации данного метода. Точность определения угловой координаты для систем обзора определяется соотношением [3, 8, 9]

$$\sigma_{\alpha} \approx 0,2 \cdot \Theta \quad (8)$$

для параболической антенны с диаметром  $d$ , ширина ДН определяется согласно формуле

$$\Theta = \gamma \cdot (\lambda / d), \quad (9)$$

где  $\gamma$  – коэффициент, порядка единицы;  $\lambda$  – длина волны несущей частоты.

Пусть  $\lambda = 0,1$  м,  $d = 1$  м. Тогда, согласно выражениям (4, 5), получим

$$\sigma_{\alpha} \approx 0,2 \cdot 1 \cdot 0,1 / 1 = 0,02^{\circ} = 0,02 \cdot 3600'' = 72''.$$

В предлагаемом методе  $\sigma_{\alpha}' \approx 5,5''$ . Тогда выигрыш в точности измерения угловых координат при применении данного метода составит

$$B = \sigma_{\alpha} / \sigma_{\alpha}' = 72'' / 5,5'' \approx 13 \text{ раз.}$$

Поскольку можно предположить, что полученный выигрыш получен только за счет применения хороших свойств узконаправленных антенн, то рассмотрим еще одно доказательство выигрыша в точности данной системы. Информативным параметром об угловом положении является время прихода отраженного сигнала относительно излученного, т.е. метод измерения не амплитудный, а временной. Это основное преимущество метода. Действительно, параметром сигнала, который несет информацию об угловых координатах объекта в данном случае, является не амплитуда сигнала, а временной сдвиг между приведенными выше величинами.

Угловая координата определяется при помощи выражения:  $\alpha = \Omega \cdot t_{\text{изл}}$ . Тогда погрешность определения угловой координаты будет определяться как

$$\sigma_{\alpha} = \Omega \cdot \sigma_{t_{\text{изл}}} \quad (10)$$

В нашем случае, при  $\sigma_{t_{\text{изл}}} = 10^{-6}$  с,  $\Omega = 5529953,9$  угл. с/с, получим

$$\sigma_{\alpha} = 5529953,9 \cdot 10^{-6} \approx 5,5 \text{ угл. с.}$$

Сравним потенциальные точности приведенных методов измерения угловых координат. Потенциальная точность амплитудного метода [11]:

$$\sigma_{\alpha}^2 = \frac{1}{4\pi^2 \mu \Delta \vartheta_{\text{СК}}^2} = \frac{1}{4\pi^2 \mu \frac{d_{\text{СК}}^2}{\lambda^2}}, \quad (11)$$

где  $\mu$  – энергетическое отношение сигнал/шум;  $d$  – диаметр антенны радиотехнической системы;  $\lambda$  – длина волны сигнала, который применяется.

Для современных систем величина  $\lambda = 3 \div 10$  см, а величина  $d = 20$  м. Заметим при этом, что для систем обзора (то есть, для систем с ФАР,  $d = 2$  м). Таким образом, максимальное отношение  $d/\lambda$  может составлять величину порядка 600 – 700.

Потенциальная точность измерения временной задержки

$$\sigma_{\tau}^2 = \frac{1}{4\pi^2 \mu \Delta f_{\text{СК}}^2}, \quad (12)$$

где  $\Delta f_{\text{СК}}$  – среднеквадратичная ширина спектра сигнала. Для современных систем при применении упомянутых выше сигналов эта величина

составляет  $\Delta f_{\text{СК}} = 10^6$ . При пересчете потенциальная точность измерения углов определяется по формуле

$$\sigma_{\alpha}^2 = \Omega \cdot \sigma_{\tau}^2. \quad (13)$$

Таким образом, при других равных условиях дисперсия выражения (11) будет относиться к дисперсии выражения (13) с учетом размерного коэффициента потерь при пересчете (например,  $K = 100$ ), как  $10^6 / (K \cdot 700) \approx 14$ .

В предлагаемом методе выигрыш в оперативности получается при сканировании луча только в угломестной плоскости. Оценим выигрыш в оперативности, обеспечиваемый предлагаемым методом. Для обзора по известным методам [5, 6, 7] необходимо затратить время

$$T_{\Sigma}' = T_{\text{обл}} \cdot m,$$

где  $m$  – количество элементарных зон облучения, получаемое из соотношения  $m = \beta / \Theta_{0,5}$ , где  $\beta$  – минимальный угол места, который просматривается ДН,  $\Theta_{0,5}$  – ширина ДН антенны по уровню половинной мощности.

При  $\Theta_{0,5} = 1^\circ$ ,  $\beta = 85^\circ$  и  $R = 400$  км:  $m = 85^\circ / 1^\circ = 85$ . Далее получаем

$$T_{\Sigma}' = 2 \cdot 400 / 3 \cdot 105 \approx 0,23 \text{ с.}$$

В предлагаемом методе время обзора равняется

$$T_{\Sigma}'' = (\beta / 5^\circ) \cdot T_{\text{ПСП}} = 17 \cdot 3,255 \cdot 10^{-3} = 55,335 \cdot 10^{-3} \text{ с.}$$

Выигрыш в оперативности при этом составит

$$B = T_{\Sigma}' / T_{\Sigma}'' = 0,23 / (55,335 \cdot 10^{-3}) \approx 4 \text{ раза.}$$

**Выводы.** Таким образом, предложенный подход к измерению угловых координат КА при использовании пространственно-временных свойств сигналов со сложной структурой реализует временной метод (7, 12). Из приведенных доказательств видно, что техническая реализация предлагаемого метода позволит существенно улучшить точность измерения угловых координат космических аппаратов, что, в свою очередь, повысит качество решения задачи контроля и управления космических аппаратов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Точность измерения параметров движения космических аппаратов радиотехническими методами // Под ред. С.Д. Сильвестрова. – М: Сов. радио, 1970. – 320 с.*

2. Бычков С.И., Лукьянов Д.П. и др. Космические радиотехнические комплексы / Под ред. С.И. Бычкова. – МО СССР, 1986. – 626 с.
3. Гришин Ю.П., Ипатов В.П. и др. / Радиотехнические системы. Под ред. Ю.М. Казаринова. – М.: Высшая школа, 1990. – С. 496.
4. Царьков Н.М. Многоканальные радиолокационные измерители. – М.: Сов. радио, 1980. – 192 с.
5. Радиолокационные устройства. Под ред. В.В. Григорина-Рябова. – М.: Сов. радио, 1970. – С. 680.
6. Шишов В.А., Ворошилов Ю.А. Многоканальная радиолокация с временным разделением каналов. – М.: Р и С, 1987. – С. 144.
7. Лукошкин А.П., Каринский С.С., Шаталов А.А. и др. Обработка сигналов в многоканальных РЛС. – М.: Р и С, 1983. – С. 328.
8. Чумак Б.А., Лысаченко И.Г. Повышение надежности управления КА в условиях ограниченного времени при однопунктной технологии управления / Матеріали III-ї науково-технічної конференції “Удосконалення системи і засобів метрологічного забезпечення озброєння та військової техніки”. – Х.: НМЦ (ВЕ). – 2001. – С. 86.
9. Лысаченко И.Г. Многопараметрическая неследающая система с пространственно-временными сигналами // Материалы второй международной научно-технической конференции «Проблемы информатики и моделирования». – Х.: НТУ “ХПИ”. – 2002. – С. 35.
10. Чумак Б.О., Дремлюга О.В., Лысаченко И.Г. Підвищення точності фільтрації параметрів руху космічних об’єктів при багатоканальному спостереженні // Системи обробки інформації.. – Х.: НАНУ, ПАНМ, ХВУ. – 2002. – Вип. 2(18). – С. 80 – 84.
11. Коростелев А.А., Клюев Н.Ф., Мельников Ю.А. Теоретические основы радиолокации / Под ред. В.Е. Дулевича. – М.: Сов. радио, 1978. – 608 с.

Поступила 1.04.2004

**ЧУМАК Борис Александрович**, канд. техн. наук, доцент, ведущий научный сотрудник отдела научного центра при ХВУ. В 1971 году окончил ХВКИУ. Область научных интересов – информационно-измерительные радиотехнические системы комплексов.

**ЛЫСАЧЕНКО Игорь Григорьевич**, канд. техн. наук, старший научный сотрудник отдела научного центра при ХВУ. В 1992 году окончил ХВВКИУ РВ. Область научных интересов – методы и способы обработки измерительной информации.

**ПОПОВ Владимир Михайлович**, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник научно-исследовательского научного центра при ХВУ. В 1989 окончил ВИРТА. Область научных интересов – радиолокационные методы распознавания.

**ДРЕМЛЮГА Александр Владимирович**, канд. техн. наук, начальник лаборатории научного центра при ХВУ. Область научных интересов – разработка и совершенствование информационно-измерительных систем для управления движением летательных объектов.