

## ПРОСТРАНСТВЕННО-ЧАСТОТНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ УГЛОВЫХ КООРДИНАТ ЛОКАЦИОННОГО ОБЪЕКТА

**В. С. Павлов<sup>а</sup>**, доктор техн. наук, профессор

<sup>а</sup>Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, РФ

**Постановка проблемы:** в настоящее время интерес к задаче определения угловых координат локационного объекта на основе сочетания моноимпульсного фазового метода со сканированием (вращением) фазовых центров приема связан с перспективным применением радиолокационных координаторов на вращающихся платформах/носителях, что ставит ряд вопросов, требующих научно-технической проработки. **Цель исследования:** раскрытие специфики реализации моноимпульсного фазового метода в условиях вращения фазовых центров приема, включая обоснование двухплоскостной процедуры определения угловых координат локационного объекта, и выявление технического результата, который потенциально может быть достигнут в данных условиях. **Результаты:** предложен пространственно-частотный метод определения угловых координат локационного объекта, оперирующий преобразованием данных координат в параметры частотной модуляции принимаемого локационного сигнала. Показано, что технический результат предложенного метода состоит в значительном расширении угловой рабочей области однозначного определения каждой из двух угловых координат локационного объекта относительно аналогичных известных методов, в частности, «классического» метода фазовой интерферометрии. При этом растров данной области можно задавать, вводя ограничение по ширине спектра обрабатываемых сигналов. **Практическая значимость:** изложенный пространственно-частотный метод определения угловых координат локационного объекта представляет интерес для практического применения как с позиции снижения вероятности срыва следа измерения, так и при внешних возмущениях опорного направления в бортовых радиолокационных координаторах.

**Ключевые слова** — интерферометрия, моноимпульсный, пространственно-частотный, сканирование, угловые координаты, частотная модуляция.

### Введение

Задача определения угловых координат локационного объекта (ЛО) является одной из наиболее важных для радиолокационных систем различного назначения, а внедрение новых методов и технических средств решения данной задачи сопровождает весь исторический путь развития радиолокации [1].

В настоящее время для определения угловых координат ЛО широкое распространение имеют как последовательные методы, реализуемые на основе изменения во времени пространственных характеристик антенны (ориентации антенного луча) [1–3], так и параллельные или моноимпульсные методы [1–4], использующие два и более пространственно рассовмещенных приемных или передающих [3] каналов. Известны также и сочетания последовательных и параллельных методов, например, на основе дополнения моноимпульсных методов линейным [2] или коническим [4] сканированием (моноимпульсные методы [1]). В литературных источниках эти сочетания представлены отдельными инженерными разработками, направленными на достижение того или иного частного технического результата.

Сочетание моноимпульсного фазового метода с непрерывным по времени круговым перемеще-

нием используемых в данном методе антенн — сканированием фазовых центров приема [5], считается весьма сложным для практической реализации [2, 4], что, наряду с неочевидностью принципиально достижимого технического результата от такого сочетания, ограничивает распространение соответствующих технических решений в задачах определения угловых координат ЛО.

Однако совершенствование технологической базы антенн с электронным управлением и многообразие способов применения радиолокационных систем в современных условиях [3], например на вращающихся платформах или носителях (что обуславливает круговое сканирование фазовых центров приема), позволяют обойти отмеченные сложности практической реализации, оставляя, тем не менее, нерешенным главный методический вопрос о техническом результате, который потенциально может быть достигнут при сочетании моноимпульсного фазового метода с круговым перемещением фазовых центров приема.

### Пространственно-частотное преобразование угловых координат локационного объекта

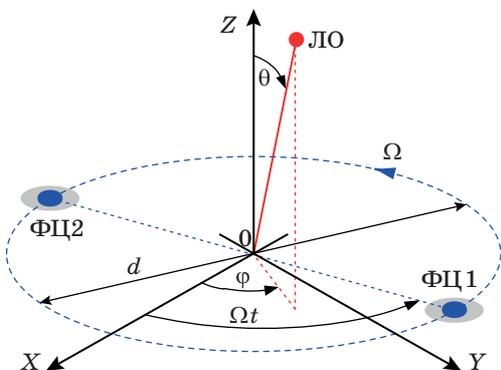
Проведем анализ факторов, участвующих в определении двух угловых координат ЛО в условиях кругового перемещения двух фазовых цен-

тров приема «классического» одноплоскостного интерферометра, являющегося базисом моноимпульсных фазовых радиолокационных устройств [4]. Будем считать, что при таком перемещении оба фазовых центра приема вращаются вокруг точки, которая равноотстоит от каждого из них, с круговой частотой  $\Omega$  и в плоскости, ортогональной опорному или равносигнальному [1–5] направлению на ЛО.

Геометрическую модель описанных условий пространственно-временного приема иллюстрирует рис. 1, где угловое положение ЛО относительно опорного направления, совпадающего с осью  $OZ$ , характеризуется двумя сферическими координатами — широтой  $\theta$  и долготой  $\varphi$ , а положение двух фазовых центров приема  $\PhiЦ1$  и  $\PhiЦ2$  в плоскости приемного раскрыва — двумя полярными углами  $\Omega t$ ,  $\Omega t + \pi$  и диаметром окружности сканирования  $d$ , равной базе пеленгации исходного моноимпульсного фазового метода.

Каждый из двух фазовых центров приема будем рассматривать как эквивалентную точку приема, к которой приведена половина эффективной площади одной общей антенны [6] или эффективная площадь одной из двух разнесенных антенн [3], а также подключен собственный канал приема. При этом сигналы от первой  $x_1(t)$  и второй  $x_2(t)$  эквивалентных точек приема на выходе двухканального моноимпульсного приемного тракта [4] различаются только по фазе, в которой содержится информация об угловых координатах ЛО.

В представленной на рис. 1 геометрической модели можно увидеть схожесть с аналогичной моделью вращения эквивалентных точек приема, используемой для иллюстрации доплеровского и дифференциально-фазового методов радиопеленгации [7]. Однако в радиопеленгации плоскость вращения эквивалентных точек приема является горизонтальной плоскостью пеленгования [8], тогда как в рассматриваемом радиолокационном приложении эта плоскость ортогональна опорно-



■ Рис. 1. Геометрическая модель пространственно-частотного метода определения угловых координат ЛО

му направлению (оси  $OZ$  на рис. 1), относительно которого осуществляется определение угловых координат ЛО. Таким образом, отличие рассматриваемой радиолокационной координатной задачи от задач радиопеленгации имеет место уже на уровне исходных геометрических моделей.

С учетом кругового перемещения двух эквивалентных точек приема взаимный (межканальный) комплексный корреляционный момент сигналов  $x_1(t)$  и  $x_2(t)$  в фиксированный момент времени  $t$  равен

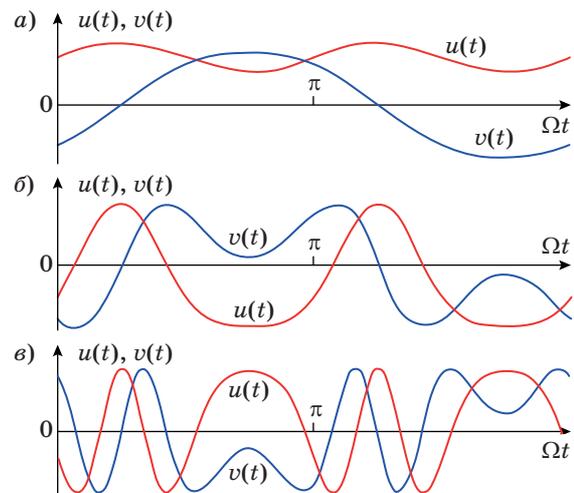
$$z(t) = \mathbf{M}\{x_1(t)x_2^*(t)\} = A(t)\exp(j\Theta \cos(\Omega t - \varphi)), \quad (1)$$

где  $\mathbf{M}\{\}$  — оператор математического ожидания по ансамблю реализаций [9]; «\*» — знак комплексного сопряжения;  $A(t)$  — амплитудный множитель;  $\Theta = 2\pi(d/\lambda)\sin\theta$  — нормированная широта ЛО ( $\lambda$  — длина волны).

Из (1) видно, что результат вычисления взаимного корреляционного момента имеет действительную  $u(t)$  и мнимую  $v(t)$  составляющие:  $z(t) = u(t) + jv(t)$ . Временные процессы этих составляющих иллюстрируют рис. 2, а–в на периоде  $T = 2\pi/\Omega$  при значениях  $\Theta$ , равных 1, 3 и 6, что соответствует малым, средним и большим значениям широты ЛО (при  $\varphi = 0$ ).

Наиболее важное обстоятельство, которое прослеживается по рис. 2 при увеличении  $\Theta$ , состоит в усилении изменчивости процессов  $u(t)$  и  $v(t)$ , что можно рассматривать через изменение их спектральных характеристик.

Данное обстоятельство, наряду с (1), позволяет провести аналогию между рассматриваемым преобразованием угловых координат ЛО и гармонической частотной модуляцией [10], в которой  $\Theta$  играет роль индекса модуляции. Раскрывая эту анало-



■ Рис. 2. Действительная  $u(t)$  и мнимая  $v(t)$  составляющие межканального взаимного корреляционного момента при  $\Theta = 1$  (а);  $\Theta = 3$  (б);  $\Theta = 6$  (в)

гию, определим на основе (1) мгновенную частоту  $\omega(t)$  процесса  $z(t)$  как производную его фазы:

$$\omega(t) = \frac{v'(t)u(t) - u'(t)v(t)}{u^2(t) + v^2(t)} = -\Theta\Omega\sin(\Omega t - \varphi) = \Theta_Y\Omega\cos\Omega t - \Theta_X\Omega\sin\Omega t, \quad (2)$$

где  $\Theta_X = \Theta\cos\varphi$  и  $\Theta_Y = \Theta\sin\varphi$  — нормированные угловые координаты ЛО, соответствующие углам между осью  $OZ$  и проекциями направления на ЛО на плоскости  $XOZ$  и  $YOZ$  (см. рис. 1).

Прямая пропорциональная связь между нормированной шириной ЛО и частотой  $\omega(t)$  в (2) указывает на то, что эта частота выступает в качестве информационного неэнергетического параметра [5, 11], в который преобразуются угловые координаты ЛО. В силу такого преобразования описанное сочетание моноимпульсного фазового метода с вращением двух фазовых центров приема можно рассматривать в качестве базиса пространственно-частотного метода определения угловых координат ЛО.

Следует сказать, что преобразование угловых координат ЛО в параметры амплитудной модуляции принимаемого локационного сигнала хорошо известно и является основой метода конического сканирования [1, 2, 5], тогда как описанное преобразование в параметры частотной модуляции представляет интерес для дальнейшего исследования.

Анализ (2) говорит об отсутствии факторов, которые вносили бы неоднозначность в определение координат  $\Theta_X$  и  $\Theta_Y$ , а также ограничивали бы диапазоны их значений. Этот результат важен прежде всего тем, что неоднозначность определения угловых координат ЛО фазовым методом является существенной методической проблемой данного метода [12] (особенно при больших отношениях  $d/\lambda$ ), разрешение которой часто требует принятия дополнительных мер, в частности, многоскальных технических реализаций [11]. В этой связи представленная в (2) линейная однозначная связь ширины ЛО с неэнергетическим информационным параметром  $\omega(t)$  позволяет дифференцировать исходный моноимпульсный фазовый метод, наделяя его возможностью расширять угловую рабочую область однозначного определения каждой из двух угловых координат ЛО по ортогональным плоскостям  $XOZ$  и  $YOZ$ .

Уточним тот факт, что возможность неограниченного расширения указанной рабочей области получена лишь теоретически на основе упрощенной модели обработки принимаемых локационных сигналов в бесконечно широкой полосе частот. В практических приложениях следует ожидать наличия ограничивающего фактора для такого расширения, исходя из спектральных характеристик обрабатываемых сигналов. При рас-

крытии этого вопроса желательно опираться на конкретную процедуру пространственно-частотного метода определения угловых координат ЛО.

### Вычислительная процедура определения угловых координат локационного объекта

При записи данной процедуры учтем обоснованный в работе [11] и устоявшийся на практике способ нормировки в дискриминаторах радиолокационных измерительных систем, реализуемый за счет автоматической регулировки усиления. Считая, что время корреляции процесса  $A(t)$  в (1) (флюктуаций мощности принимаемого локационного сигнала) существенно превышает период сканирования  $T$ , процесс  $A(t)$  можно заменить на его среднюю на интервале  $T$  величину  $A = E\{A(t)\}$ , а нормирующую компоненту в (2) — на среднюю величину  $E\{u^2(t) + v^2(t)\}$ , где  $E\{\cdot\} = (1/T) \int_{-T/2}^{T/2} (\cdot) dt$  — оператор временного усреднения на интервале  $T$ .

Обращаясь к (2), отметим, что процесс  $\omega(t)$  является действительным, а его разложение в комплексный ряд Фурье [10] содержит только два члена с комплексно-сопряженными спектральными коэффициентами на частотах  $\Omega$  и  $-\Omega$ . Свойство комплексной сопряженности спектральных коэффициентов распространяется и на возможное мешающее воздействие, являющееся действительным в силу того, что формируется по аналогии с (2) из действительных мешающих процессов. Данные факты позволяют оперировать только одной гармоникой спектрального разложения с частотой  $\Omega$  и представить искомую процедуру формирования оценок  $\varepsilon_X$  и  $\varepsilon_Y$ , соответствующих координатам  $\Theta_X$  и  $\Theta_Y$ , следующим образом:

$$\varepsilon_X = K \operatorname{Im} \varpi, \quad \varepsilon_Y = K \operatorname{Re} \varpi, \quad (3)$$

где

$$\varpi = E\{(v'(t)u(t) - u'(t)v(t))\exp(-j\Omega t)\} \quad (4)$$

— коэффициент при первой гармонике разложения ненормированной мгновенной частоты в комплексный ряд Фурье;  $K = 2/\left[\Omega E\{u^2(t) + v^2(t)\}\right]$  — нормирующий сомножитель, обеспечивающий единичную крутизну преобразования координаты  $\Theta_{X(Y)}$  в ее оценку  $\varepsilon_{X(Y)}$ .

Процедура (3) пространственно-частотного метода определения угловых координат ЛО не вызывает затруднений по техническому исполнению и может быть рекомендована для практического использования.

Тем не менее выражения (3) и (4) не отражают в явном виде влияние спектральных характеристик процессов  $u(t)$  и  $v(t)$  на оценки  $\varepsilon_X$  и  $\varepsilon_Y$ . С этой целью трансформируем процедуру (3) в частотную область, используя разложения каж-

дого из процессов  $u(t)$  и  $v(t)$  в ограниченный комплексный ряд Фурье, содержащий  $2N + 1$  членов. Номер  $n$  для члена этого ряда принимает значения от  $-N$  до  $N$ , а  $n$ -е коэффициенты разложения процессов  $u(t)$  и  $v(t)$  соответственно равны:  $U_n = \mathbf{E}\{u(t)\exp(-jn\Omega t)\}$  и  $V_n = \mathbf{E}\{v(t)\exp(-jn\Omega t)\}$ .

Отметим важные свойства введенных спектральных коэффициентов: а)  $U_{-n} = U_n^*$  и  $V_{-n} = V_n^*$ , так как оба процесса  $u(t)$  и  $v(t)$  являются действительными; б) все коэффициенты  $U_n$  с нечетными индексами и все коэффициенты  $V_n$  с четными индексами равны нулю, поскольку процесс  $u(t) = A\cos(\Theta\cos(\Omega t - \varphi))$  содержит только четные гармоники разложения и постоянную составляющую, а процесс  $v(t) = A\sin(\Theta\cos(\Omega t - \varphi))$  — только нечетные гармоники. Последнее свойство следует из известных формул разложения аналогичных функций в тригонометрические ряды [13].

Учитывая отмеченные свойства и преобразуя (4) на основе принятых спектральных разложений, в результате последовательности аналитических действий получим

$$\varpi = j\Omega \sum_{m=-L}^L (4m+1)U_{2m}^*V_{2m+1}, \quad (5)$$

где  $L$  — предел суммирования, задаваемый числом  $N$ . Из (5) видно, что наибольшее значение индекса при спектральном коэффициенте равно  $2L + 1$ , что соответствует нечетному  $N = 2L + 1$ . Следовательно, для охвата полного набора гармоник процессов  $u(t)$  и  $v(t)$  желательно полагать число  $N$  нечетным.

Определяемый в (5) способ вычисления величины  $\varpi$  вводит ограничение на спектральный состав составляющих, участвующих в формировании оценок  $\varepsilon_X$  и  $\varepsilon_Y$ , через число  $L$ . Данный способ может быть интересен для практики при цифровой реализации, поскольку он описывает также и фильтрацию процессов  $u(t)$  и  $v(t)$  в частотной области (что применяется достаточно часто благодаря развитию методов и техники быстрого преобразования Фурье [14]). При этом основная вычислительная операция состоит в вычислении спектральной свертки для одного значения ее аргумента, равного  $\Omega$ .

### Анализ технического результата пространственно-частотного метода

Функциональные зависимости от угловых координат ЛО в (5) нетрудно найти, раскрывая связи коэффициентов  $U_{2m}$  и  $V_{2m+1}$  с координатами  $\Theta$  и  $\varphi$ . Применяя для этого известные [13] формулы разложения на основе функций Бесселя, имеем

$$\begin{aligned} U_{2m}(\Theta, \varphi) &= A(-1)^m f_{2m}(\Theta, \varphi); \\ V_{2m+1}(\Theta, \varphi) &= A(-1)^m f_{2m+1}(\Theta, \varphi), \end{aligned} \quad (6)$$

где  $f_n(\Theta, \varphi) = J_n(\Theta)\exp(-jn\varphi)$  — вспомогательная функция,  $J_n(\cdot)$  — функция Бесселя  $n$ -го порядка.

Формулы (6) можно использовать и для спектрального описания нормирующего множителя в (3), руководствуясь равенством Парсеваля [10]. При этом  $\mathbf{E}\{u^2(t) + v^2(t)\} = A^2 \sum_{n=-N}^N J_n^2(\Theta)$ .

Подставляя последовательно (6) в (5), а (5) — в (3), представим в конечном виде зависимости оценок  $\varepsilon_X$  и  $\varepsilon_Y$  от угловых координат ЛО:

$$\varepsilon_X(\Theta, \varphi) = \Pi(\Theta)\cos\varphi; \quad \varepsilon_Y(\Theta, \varphi) = \Pi(\Theta)\sin\varphi, \quad (7)$$

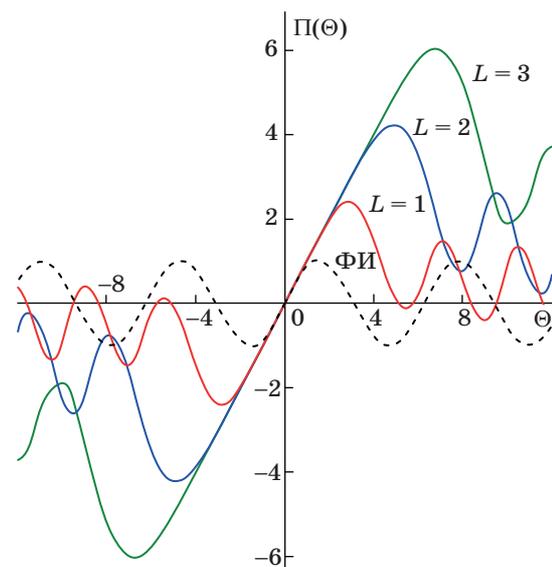
где

$$\Pi(\Theta) = \frac{2 \sum_{m=-L}^L (4m+1)J_{2m}(\Theta)J_{2m+1}(\Theta)}{\sum_{n=-2L-1}^{2L+1} J_n^2(\Theta)} \quad (8)$$

— пеленгационная характеристика, соответствующая пространственно-частотному методу определения угловых координат ЛО.

Из (7) следует, что зависимости оценок  $\varepsilon_X(\Theta, \varphi)$  и  $\varepsilon_Y(\Theta, \varphi)$  от долготы ЛО повторяют соответствующие зависимости его координат  $\Theta_X$  и  $\Theta_Y$ , тогда как связь данных оценок с нормированной широтой ЛО, отражаемая характеристикой  $\Pi(\Theta)$ , требует отдельного рассмотрения.

Представленное на рис. 3 семейство характеристик  $\Pi(\Theta)$  рассчитано по (8) при  $L = 1, 2, 3$ . Для сравнения на данном рисунке пунктиром изображена аналогичная пеленгационная характеристика для «классического» фазового интерфе-



■ Рис. 3. Пеленгационные характеристики при пространственно-частотном методе определения угловых координат ЛО и базовая пеленгационная характеристика ФИ

рометра  $\Phi И$  [1–4, 12] в ненормированном виде, которую примем в качестве базовой.

Главный технический результат рассматриваемого пространственно-частотного метода состоит в обеспечении широкого раствора угловой рабочей области, в которой возможно однозначное определение каждой из двух угловых координат ЛО (см. рис. 3). Видно, что ширина рабочего участка отдельной характеристики  $\Pi(\Theta)$ , равная расстоянию между ее минимумом и максимумом, значительно превышает аналогичную ширину базовой пеленгационной характеристики  $\Phi И$ . Более того, данную ширину можно задавать посредством соответствующего ограничения набора гармоник процессов  $u(t)$  и  $v(t)$  через число  $N = 2L + 1$ . Дополнительной важной положительной особенностью каждой из характеристик  $\Pi(\Theta)$  на рис. 3 является строгая линейность в пределах практически всего ее рабочего участка.

В целях количественного выражения описанного технического результата определим нормированную полуширину  $\Delta\Theta$  характеристики  $\Pi(\Theta)$ , равную координате ее максимального значения. В результате численных расчетов по (8) получим  $\Delta\Theta \approx 0,97(2L + 1) = 0,97N$  при  $L \geq 2$ , а в двух частных случаях  $\Delta\Theta \approx 3$  при  $L = 1$  и  $\Delta\Theta \approx 1,161$  при  $L = 0$ . Таким образом, можно приближенно полагать, что  $\Delta\Theta \approx 2L + 1$  при  $L \geq 1$ . Соотнося величину  $\Delta\Theta$  с нормированной полушириной базовой пеленгационной характеристики  $\Phi И$  (см. рис. 3), равной  $\pi/2$ , имеем увеличение данной полуширины приближенно в  $2(2L + 1)/\pi = 2N/\pi$  раз при  $L \geq 1$  (исключая отдельный случай  $L = 0$ , где имеет место уменьшение полуширины в 1,35 раза).

Отметим, что раствор рабочей области определения каждой из двух угловых координат ЛО наиболее часто задается исходно, например, на стадии внешнего проектирования радиолокационной системы, при этом предельные значения полуширины пеленгационной характеристики, превышающие 20 градусов, маловероятны. Учитывая эти возможные значения и раскрывая величину  $\Delta\Theta$ , нетрудно приближенно выразить полуширину пеленгационной характеристики в градусах:  $\Delta\theta \approx 9N\lambda/d$ .

Полученное значительное (относительно широко распространенного случая  $\Phi И$ ) расширение пеленгационной характеристики важно для практики как с позиции увеличения углового рабочего диапазона по каждой из двух угловых координат ЛО как при несledящем измерении [5], так и с позиции снижения вероятности срыва автосопровождения ЛО по направлению [5] (в случае использования рассмотренного пространственно-частотного метода в дискриминаторах систем углового автосопровождения). Кроме того, это расширение играет важную роль в обеспечении надежности радиоконтакта с ЛО в услови-

ях внешних возмущений опорного направления [15], когда приемный раскрыв и связанная с ним измерительная система координат (см. рис. 1) жестко зафиксированы на маневрирующем подвижном носителе, например беспилотном летательном аппарате [16].

При расчетах полуширины  $\Delta\theta$  для конкретных практических приложений следует учитывать диаграммы направленности двух используемых антенн, которые изначально были сведены к двум эквивалентным точкам приема, не имеющим свойств пространственной избирательности. Анализ этого фактора представляет собой самостоятельную перспективную задачу исследования пространственно-частотного метода определения угловых координат ЛО. Тем не менее упрощенное рассмотрение этой задачи позволяет заключить, что в случае формирования двух эквивалентных точек приема на одном приемном раскрыве [6] эффект от увеличения числа  $N$  (более пяти) будет скорректирован диаграммами направленности, тогда как при разнесении двух антенн [3] на расстояние  $d$ , превышающее их линейный размер, число  $N$  может быть принято весьма большим. Уточнение этого числа связано с практической реализацией приемного раскрыва конкретной радиолокационной системы, использующей изложенный метод определения угловых координат ЛО.

## Заключение

Сочетание моноимпульсного фазового метода определения угловых координат ЛО с круговым перемещением (вращением) двух его фазовых центров приема обуславливает преобразование направления на ЛО в частоту детектируемого сигнала, которая изменяется по гармоническому закону синхронно с данным вращением, а ее амплитуда и начальная фаза пропорциональны сферическим координатам соответственно широты и долготы ЛО. Такое преобразование вместе с обработкой частотного информационного параметра можно трактовать как отдельный пространственно-частотный метод определения угловых координат ЛО.

Техническим результатом данного пространственно-частотного метода является значительное расширение телесного угла, в котором обеспечивается однозначность определения каждой из двух угловых координат ЛО относительно аналогичных известных методов. Это имеет весомое практическое значение в условиях внешних возмущений опорного направления, вызванных, например, непостоянством углов рыскания и тангажа беспилотного летательного аппарата [16] (которые не всегда могут быть полностью ском-

пенсированы [15]), а также с позиции снижения вероятности срыва следящего измерения [5] или потери радиоконтакта с ЛО. При этом ширина раствора линейного рабочего участка пеленгацион-

ной характеристики может задаваться через параметры спектральной обработки принимаемого локационного сигнала в соответствии с конкретными условиями практической реализации.

## Литература

1. Radar Handbook/Editor in Chief Skolnik Merrill I. (Merrill Ivan). Third Edition. — The McGraw-Hill Companies, 2008.
2. Зуфрин А. М. Методы построения судовых автоматических угломерных систем. — Л.: Судостроение, 1970. — 408 с.
3. Holder J. E. Angle-of-Arrival Estimation Using Radar Interferometry. Methods and Applications. — Edison, NJ: SciTech Publishing, 2014. — 358 p.
4. Леонов А. И., Фомичев К. И. Моноимпульсная радиолокация. — М.: Радио и связь, 1984. — 312 с.
5. Вопросы статистической теории радиолокации: в 2 т. / под ред. Г. П. Тартаковского. — М.: Сов. радио, 1964. Т. 2. — 1080 с.
6. Павлов В. С., Турецкий Л. С., Французов А. Д. Амплитудно-фазовые распределения поля в апертуре многоканальной пеленгационной системы // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2008. Вып. 5. С. 9–14.
7. Беляевский Л. С., Новиков В. С., Олянюк П. В. Основы радионавигации. — М.: Транспорт, 1982. — 288 с.
8. ГОСТ 23288-78. Радиопеленгаторы. Термины и определения: сб. стандартов. Ч. 3. — М.: Стандартинформ, 2005. — С. 173–176.
9. Тихонов В. И. Нелинейные преобразования случайных процессов. — М.: Радио и связь, 1986. — 296 с.
10. Гоноровский И. С. Радиотехнические цепи и сигналы. — М.: Дрофа, 2006. — 720 с.
11. Теоретические основы радиолокации / под ред. В. Е. Дулевича. — М.: Сов. радио, 1978. — 608 с.
12. Wohlleben R., Mattes H., Krichbaum Th. Interferometry in Radioastronomy and Radar Techniques. — N. Y.: Springer Publishing, 1991. — 210 p.
13. Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables/ed. by Milton Abramowitz, Irene Ann Stegun. — Washington D.C., USA; N. Y., USA: United States Department of Commerce, National Bureau of Standards; Dover Publications, 1983.
14. Oppenheim A. V., Shafer R. W. Discrete-Time Signal Processing. 2nd ed. — Prentice-Hall, 1999. — 870 p.
15. Шаров С. Н. Основы проектирования координаторов систем управления движущимися объектами. — Л.: Гособразованіе СССР, 1990. — 96 с.
16. Авиационные системы радиоуправления: в 3 т. / под ред. А. И. Канащенкова и В. И. Меркулова. — М.: Радиотехника, 2003. Т. 2. — 392 с.

UDC 621.396.96

doi:10.15217/issn1684-8853.2016.4.94

## Spatial-Frequency Method for Angular Coordinates Estimation of Radar Object

Pavlov V. S.<sup>a</sup>, Dr. Sc., Tech., Professor, w14z@yandex.ru

<sup>a</sup>Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, B. Morskaya St., 190000, Saint-Petersburg, Russian Federation

**Purpose:** Nowadays an interest to the problem of radar object angular coordinates estimation based on a combination of monopulse phase method with the receiving phase centers scanning (rotating) is stipulated by the radar coordinators perspective application upon rotating platforms/carriers, thus sets a number of questions that require theoretical and practical elaboration. The paper has as its goal the realization specifics consideration for monopulse phase method under conditions of receiving phase centers rotation, so comprising a substantiation of biplanar procedure for radar object angular coordinates estimation and a technical result revelation, that can be achieved potentially in the stated conditions. **Results:** Spatial-frequency method of radar object angular coordinates estimation is proposed, which operates with these coordinates conversion into frequency modulation parameters of the receiving radar signal. It is shown that a technical result the proposed method is consisted in considerable expansion of the angular operating area for single-valued estimation of each of two angular coordinates of radar object comparatively to the similar methods, particularly the “classical” method of phase interferometry. Along with it the aperture of this area can be assigned by a spectrum width restriction of the processing signals. **Practical relevance:** The described spatial-frequency method of radar object angular coordinates estimation possesses an interest for practical application as form a position of probability reduction for the follow-up measurement breakdown as well as under the exterior disturbances of the reference direction in on-board radar coordinators.

**Keywords** — Angular Coordinates, Frequency Modulation, Interferometry, Monopulse, Scanning, Spatial-Frequency.

## References

1. Radar Handbook / Editor in Chief Skolnik Merrill I. (Merrill Ivan). Third Edition. The McGraw-Hill Companies, 2008.
2. Zufirin A. M. *Metody postroeniia sudovykh avtomaticheskikh uglomernykh sistem* [Construction Methods of the Ship's Automatic Angular Gage Systems].

- Leningrad, Sudostroenie Publ., 1970. 408 p. (In Russian).
3. Holder J. E. *Angle-of-Arrival Estimation Using Radar Interferometry, Methods and Applications*. Edison, NJ, SciTech Publ., 2014. 358 p.
  4. Leonov A. I., Fomichjov K. I. *Monoimpul'snaia radiolokatsiia* [Monopulse Radiolocation]. Moscow, Radio i sviaz' Publ., 1984. 312 p. (In Russian).
  5. *Voprosy statisticheskoi teorii radiolokatsii* [Questions of Statistical Theory of Radiolocation]. Ed. by G. P. Tartakovskij. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1964. Vol. 2. 1080 p. (In Russian).
  6. Pavlov V. S., Turnetskij L. S., Frantsuzov A. D. Amplitude-Phase Field Distributions in the Multichannel Direction Finding System's Aperture. *Izvestiia vuzov Rossii. Radioelektronika*, 2008, no. 5, pp. 9–14 (In Russian).
  7. Beliaevskij L. S., Novikov V. S., Olianiuk P. V. *Osnovy radionavigatsii* [Fundamentals of Radionavigation]. Moscow, Transport Publ., 1982. 288 p. (In Russian).
  8. State Standard 23288-78. Radio Direction Finders. Terms and Definitions. In: *Sbornik standartov* [Collection of Standards]. Moscow, Standartinform Publ., 2005, pp. 173–176 (In Russian).
  9. Tikhonov V. I. *Nelineinye preobrazovaniia sluchainykh protsessov* [Nonlinear Transformations of Random Processes]. Moscow, Radio i sviaz' Publ., 1986. 296 p. (In Russian).
  10. Gonorovskij I. S. *Radiotekhnicheskie tsepi i signaly* [Radio-technical Circuits and Signals]. Moscow, Drofa Publ., 2006. 720 p. (In Russian).
  11. *Teoreticheskie osnovy radiolokatsii* [Theoretical Fundamentals of Radiolocation]. Ed. by V. E. Dulevich. Moscow, Radio i sviaz' Publ., 1978. 608 p. (In Russian).
  12. Wohlleben R., Mattes H., Krichbaum Th. *Interferometry in Radioastronomy and Radar Techniques*. New York, Springer Publ., 1991. 210 p.
  13. *Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables*. Ed. by Milton Abramowitz, Irene Ann Stegun. Washington D.C., USA; New York, USA, United States Department of Commerce, National Bureau of Standards; Dover Publications, 1983.
  14. Oppenheim A. V., Shafer R. W. *Discrete-Time Signal Processing*. 2nd ed. Prentice-Hall, 1999. 870 p.
  15. Sharov S. N. *Osnovy proektirovaniia koordinatov sistem upravleniia dvizhushchimisja ob'ektami* [Engineering Fundamentals for Coordinators of Moving Objects Control Systems]. Leningrad, Gosobrazovanie SSSR Publ., 1990. 96 p. (In Russian).
  16. *Aviatsionnye sistemy radioupravleniia* [Aviation Radio Control Systems]. Ed. by A. I. Kanashhenkov and V. I. Merkulov. Moscow, Radiotekhnica Publ., 2003. Vol. 2. 392 p. (In Russian).

## ПАМЯТКА ДЛЯ АВТОРОВ

*Поступающие в редакцию статьи проходят обязательное рецензирование.*

При наличии положительной рецензии статья рассматривается редакционной коллегией. Принятая в печать статья направляется автору для согласования редакторских правок. После согласования автор представляет в редакцию окончательный вариант текста статьи.

Процедуры согласования текста статьи могут осуществляться как непосредственно в редакции, так и по e-mail (ius.spb@gmail.com).

При отклонении статьи редакция представляет автору мотивированное заключение и рецензию, при необходимости доработать статью — рецензию. Рукописи не возвращаются.

*Редакция журнала напоминает, что ответственность за достоверность и точность рекламных материалов несут рекламодатели.*