

УДК 621.396.969

<sup>1</sup>В.П. Харченко, д.т.н.  
<sup>2</sup>А.Г. Сорочан, к.т.н.

## МАЛОБАЗОВИЙ МЕТОД ПЕЛЕНГАЦІЇ ВИСОКОЇ ТОЧНОСТІ

<sup>1</sup>Национальный авиационный университет, г. Киев, [nauka@nau.edu.ua](mailto:nauka@nau.edu.ua)<sup>2</sup>Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, [sorochan\\_kpm@mail.ru](mailto:sorochan_kpm@mail.ru)

Из сравнения характеристик широко известного метода фазовой пеленгации и малоизвестного метода J-корреляционной пеленгации, раскрываются его преимущества, отмечаются особенности работы, достоинства и недостатки.

## Введение

Известные методы измерения угловых координат подразделяются на амплитудные, фазовые и амплитудно-фазовые [1, 2]. Амплитудные методы, в свою очередь, разделились на метод максимума и метод сравнения (равносигнальный метод). Точность измерения амплитудным методом низкая, т.к. пеленг определяется направлением на цель максимума диаграммы направленности антенны. Квадрат диаграммы направленности антенны описывает пеленгационную характеристику. Точность измерения любого измерительного прибора определяется крутизной характеристики в точке измерения, а так как в вершине и ее окрестности крутизна диаграммы направленности равна нулю или же крайне мала, то указанная область характеристики определяет зону нечувствительности пробора, а следовательно, и точность измерения. Метод сравнения повышает точность измерения угловых координат, однако она остается невысокой [3]. Достоинство метода – простота. Фазовый метод пеленгации обладает более высокой точностью измерения [3, 4]. В методе используются две антенны. Фазовый метод обеспечивает высокую точность измерения пеленга, но обладает малым диапазоном однозначного измерения. Для расширения функциональных возможностей пеленгационных систем получил развитие объединенный метод амплитудно-фазовой пеленгации, в котором совмещены два метода, один из которых (амплитудный) осуществляет грубое определение пеленга, другой – фазовый обеспечивает требуемую точность измерения. Из схем, реализующих фазовый метод, наиболее наглядной является схема с двумя разнесенными в пространстве антеннами (рис. 1), в которой сдвиг фаз принятых колебаний из-за различия путей распространения радиоволны от цели до антенн определяется как  $\Delta\psi = 2\pi \left(\frac{B}{\lambda}\right) \sin \varphi$ , где  $\lambda$  – длина волны принимаемого колебания.

Пеленг цели определяется как  $\varphi = \arcsin \left[ \frac{\lambda \Delta\psi}{2\pi B} \right]$ . Выходное напряжение фазового детектора

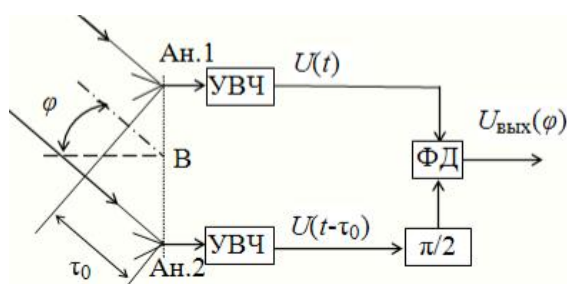


Рис.1. Схема с двумя разнесенными в пространстве антеннами: Ан.1 и Ан.2 – первая и вторая антенны;  $\varphi$  – угол прихода волны;  $\tau_0$  – временная задержка сигналов отраженных от цели и действующих на входах антенн;  $B$  – расстояние между антеннами ненаправленного действия; УВЧ – усилитель высокой частоты; ФД – фазовый детектор;  $\pi/2$  – фазовращатель.

при малых значениях  $\varphi \leq 10^\circ$

$$U_{\text{вых}}(\varphi) = k \sin \left[ \frac{2\pi B \varphi}{\lambda} \right] \approx k \frac{2\pi B \varphi}{\lambda}.$$

Пеленгационная характеристика пеленгатора

$$F(\varphi) = 2\pi \frac{B}{\lambda} \varphi. \quad \text{Крутизна пеленгационной}$$

$$\text{характеристики при } \varphi = 0 \quad S(\varphi) = \frac{2\pi B}{\lambda}.$$

Отсюда чувствительность, а следовательно, и точность пеленгации фазовым методом растут с увеличением отношения  $\frac{B}{\lambda}$ . При  $\frac{B}{\lambda} \geq \frac{1}{2}$  появляется неоднозначность измерения угла. Диапазон однозначного измерения углового положения цели (при диапазоне однозначного

измерения фазы  $\pi$  ФД) определяется из неравенства  $\sin \varphi \leq \frac{\lambda}{2B}$ .

Увеличение однозначного измерения угла достигается уменьшением базового расстояния между антеннами при одновременном пропорциональном уменьшении точности пеленгации.

Недостаток метода – отсутствие разрешающей способности, малый диапазон однозначного измерения углового положения. Таким образом, актуальной остается проблема создания высокоточного метода пеленгации с малым базовым расстоянием между антеннами.

В последние годы получил развитие корреляционный метод пеленгации, получивший название *J*-корреляционного метода [5]. Этот метод пеленгации применим для сигналов с угловой модуляцией. Название метода определено замечательными свойствами функций Бесселя, которыми описывается спектр этого сигнала.

**Цель работы** – раскрыть основные особенности в построении пеленгаторов на основе *J*-корреляционной обработки, показать пути создания малобазовой пеленгации, обеспечивающей высокую точность измерения пеленга.

### Постановка задачи исследований

Рассматривается схема (рис. 2), реализующая *J*-корреляционный метод пеленгации [6], в которой используются две ненаправленные (могут использоваться и направленные) антенны. Для решения поставленной цели полагаем, базовое расстояние между антеннами равно  $B$ . Из-за различия путей распространения радиоволны  $\Delta R$  от цели до антенн один из входных сигналов получает некоторую пространственную временную задержку  $\tau$ . Полагая, что зондирующий сигнал – простейший сигнал с угловой модуляцией описываемый выражением  $U(t) = U \cos[Wt + \beta \sin(\Omega t + \varphi)]$ , где  $U$  – амплитуда входного сигнала;  $W$  – частота входного сигнала;  $\beta$  – индекс модуляции;  $\Omega$  – частота модуляции;  $\varphi$  – начальная фаза модулирующего колебания.

Начальную фазу высокочастотного колебания полагается равной нулю. Тогда входные сигналы рассматриваемого устройства

$$U(t) = U \cos[Wt + \beta \sin(\Omega t + \varphi) + \varphi_{ц}]; \quad U(t + \tau) = U \cos[W(t + \tau) + \beta \sin(\Omega(t + \tau) + \varphi) + \varphi_{ц}],$$

где  $\tau$  – пространственная временная задержка входных сигналов, вызванная разностью путей распространения радиоволны от цели к антеннам;  $\varphi_{ц}$  – постоянный фазовый сдвиг, возникающий при отражении сигнала от цели.

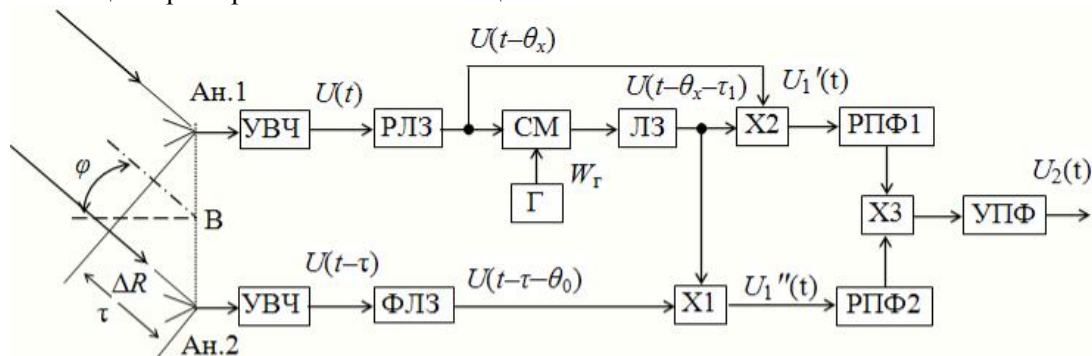


Рис.2. Схема, реализующая *J*-корреляционный метод пеленгации

В зависимости от местоположения цели величина временной задержки  $\tau$  может принимать значения от 0 до  $\tau_{\max} = B/c$ ,  $c$  – скорость распространения радиоволны в свободном пространстве.

### Основная часть исследований

В опорном канале (РЛЗ, СМ, Г, ЛЗ и X2) на выходе перемножителя X2 на частоте  $W_r$  формируется опорный сигнал, который описывается выражением

$$U_1'(t) = U_1 \cos \left[ W_r t + 2\beta \sin \left( \frac{\Omega \tau_1}{2} \right) \cos \left[ \Omega \left( t + \theta_x + \frac{\tau_1}{2} \right) + \varphi \right] + \varphi_1' \right];$$

где  $W_r$  – частота кварцевого генератора;  $\theta_x$  – временная задержка в РЛЗ;  $\tau_1$  – временная задержка в ЛЗ;  $\varphi_1' = W_r(\theta_x + \tau_1) - W\tau_1$ .

Стабільність несущей частоты сигнала  $U_1'(t)$ , определяется параметрами кварцевого генератора Г. Произведение  $2\beta \sin(0,5\Omega \tau_1) = \beta'$  [5] представляет собой вновь сформированный индекс модуляции опорного сигнала, значение которого определяется параметрами зондирующего сигнала  $\beta, \Omega$  и  $\tau_1$ . Поскольку величины  $\beta, \Omega$  и  $\tau_1$  постоянны, то индекс  $\beta' = const$ . В зависимости от выбора значения временной задержки  $\tau_1$  в ЛЗ можно устанавливать необходимый индекс модуляции, который может принимать значения в пределах  $0 \leq \beta' \leq 2\beta$ . Выбором индекса модуляции  $\beta'$  определяется спектральный состав сигнала, а так как сигнал  $U_1'(t)$  – опорный, то индекс модуляции  $\beta'$  должен выбираться из условия обеспечения максимального отношения сигнал/шум на выходе опорного канала [7].

В регулируемом канале (РЛЗ, СМ, Г, ФЛЗ и Х1) на выходе перемножителя Х1 формируется сигнал с регулируемым индексом модуляции

$$U_1''(t, \tau, \theta_x) = U_1 \cos \left[ W_{\Gamma} t + 2\beta \sin \left( \frac{\Omega}{2} (\theta_0 + \tau - \theta_x - \tau_1) \right) \cos \left[ \Omega t + \frac{\Omega}{2} (\tau + \theta_1 + \theta_x + \tau_1) + \varphi \right] + \varphi_1'' \right],$$

где  $\theta_0$  – временная задержка в линии задержки ФЛЗ;  $\varphi_1'' = W(\tau + \theta_0 - \theta_x - \tau_1) + W_{\Gamma}(\theta_x + \tau_1)$ .

Сформированный индекс модуляции определяется выражением [5]

$$2\beta \sin \left[ \frac{\Omega}{2} (\theta_0 + \tau - \theta_x - \tau_1) \right] = \beta''.$$

Результирующая задержка  $(\theta_0 + \tau - \theta_x - \tau_1) = \tau_{отн}$  – относительная временная задержка сигналов, действующих на входах перемножителя Х1. Временная задержка  $\theta_0$  в линии ФЛЗ определится из равенства  $\theta_0 = \tau_{max} + \tau_1 = \frac{B}{c} + \tau_1$ . Полагая пространственную временную задержку максимальной, т.е.  $\tau = \tau_{max}$ , а значение задержки в РЛЗ  $\theta_x = 0$ , получаем максимально возможную относительную временную задержку равной  $\tau_{отн max} = 2\tau_{max}$ , которая определяет максимальный индекс модуляции в регулируемом канале  $\beta''_{max} = 2\beta \sin[\Omega \tau_{max}]$ .

Результатом режекции несущих колебаний с частотой  $W_{\Gamma}$  в опорном и регулируемом сигналах с последующим перемножением спектральных составляющих  $U_1 J_n(\beta)$  с частотами  $W_{\Gamma} + n\Omega$  нижней боковой полосы опорного канала со спектральными составляющими  $U_1 J_{-n}(\beta)$  с частотами  $W_{\Gamma} - n\Omega$  верхней боковой полосы регулируемого канала (и наоборот) на удвоенной частоте  $2W_{\Gamma}$  формируется гармоническое колебание, которое выделяется УПФ и описывается выражением

$$U_2(t, \tau, \theta_x) = U_2 \sum_{n=1}^{\infty} J_n(\beta') J_n(\beta'') \cos[2W_{\Gamma} t + \varphi_3(\theta_x, \tau)],$$

где  $U_2$  – максимальный уровень выходного сигнала;  $\varphi_3$  – некоторая фаза, как результат обработки сигнала в устройстве.

Относительное значение амплитуды этого сигнала, как функция пространственной временной задержки  $\tau$ , представляет собой пеленгационную характеристику вида

$$F_1(\tau) = \sum_{n=1}^{\infty} J_n(\beta') J_n(\beta'') = \sum_{n=1}^{\infty} J_n(\beta') J_n \left( 2\beta \sin \left( \frac{\Omega}{2} (\theta_0 + \tau - \theta_x - \tau_1) \right) \right).$$

Характеристика  $J$ -корреляционного метода пеленгации, в отличие от фазового метода, не зависит от несущей частоты зондирующего сигнала. Вид характеристики при фиксированном значении задержки в РЛЗ  $\theta_x = \theta_0 - \tau_1$  показан на рис.3.

Пеленгационные характеристики  $J$ -корреляционного метода при обработке отраженного сигнала с модулирующей частотой  $\Omega = 30 \text{ кГц}$ , и индексом модуляции, принимающем два значения  $\beta_1 = 6$  (кривая 1) и  $\beta_2 = 3$  (кривая 2). Временная задержка в ЛЗ равна  $\tau_1 = 0,3 \text{ мкс}$ . Здесь же для сравнения приведены две относительные зависимости взаимно корреляционной функции

входных определяемой напряжением  $U_1''(\tau)$  на выходе X1. Кривая 3 получена при  $\beta_1 = 6$ , а 4 – при  $\beta_2 = 3$ . Так как индекс модуляции  $\beta''$  связан с относительной временной задержкой  $\tau_{отн}$  синусоидальной зависимостью, следовательно, индекс модуляции регулируемого канала – периодическая зависимость.

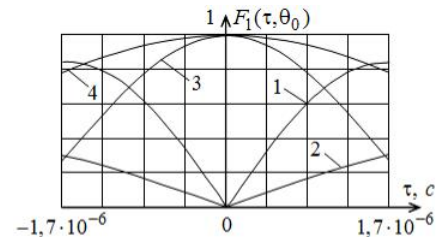


Рис.3. Характеристика J-корреляционного метода пеленгации при фиксированном значении задержки в РЛЗ

модулирующей частоты. Максимумы и минимумы функционалов имеют ярко выраженные пологие участки.

На рис. 5 приведены зависимости функционалов Бесселя различных порядков ( $n = \text{var}$ ) при одном значении модулирующей частоты  $\Omega$  и индексе модуляции  $\beta = 2$ . Для такой зависимости характерным является резкое снижение амплитуды функционалов с увеличением его порядка. Кроме того, в вершине функционалов пологий участок исчезает уже при  $n = 2$ . Для нечетных порядков функционалы принимают как положительные так и отрицательные значения, что указывает на изменение фазового спектра на этих участках на  $180^\circ$ .

Из периодичности функционала Бесселя  $J_n(\beta'')$  следует, что пеленгационная характеристика  $F_1(\tau)$  для зондирующего сигнала с модуляцией однотональным сигналом также будет строгой периодической зависимостью. Однозначность пеленгационной характеристики определяется условием  $|\Omega \tau_{\max}| \leq 1,5\pi$ .

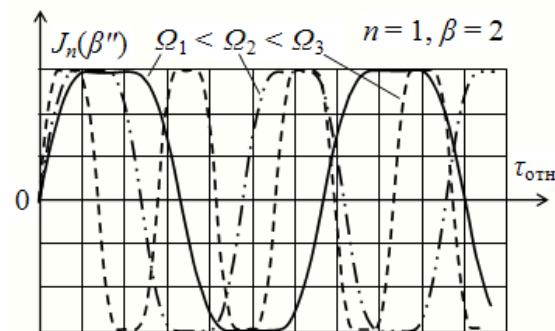


Рис.4. Зависимость функционала Бесселя первого порядка с индексом модуляции  $\beta = 2$  для различных значений модулирующих частот ( $\Omega = \text{var}$ ).

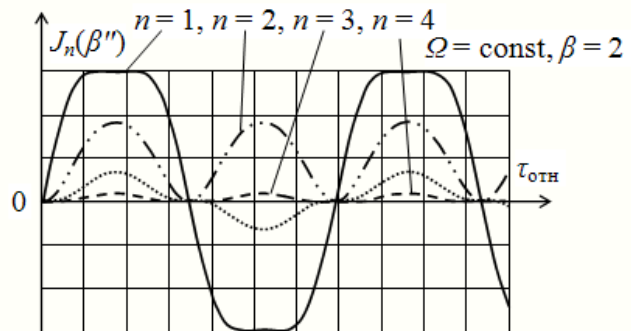


Рис.5. Зависимости функционалов Бесселя различных порядков ( $n = \text{var}$ ) при одном значении модулирующей частоты  $\Omega$  и индексе модуляции  $\beta = 2$ .

Так как максимальная пространственная временная задержка определяется равенством  $\tau_{\max} = B/c$ , то из полученного неравенства следует, что однозначность пеленгационной характеристики определяется базовым расстоянием между антеннами, которое должно удовлетворять неравенству  $B \leq \frac{\pi c}{\Omega}$ . Отсюда в данном методе пеленгации базовое расстояние между антеннами ограничивается сверху и обратно пропорционально модулирующей частоте  $\Omega$ . Крутизна пеленгационной характеристики

$$S_1(\tau) = \frac{dF_1(\tau)}{d\tau} = \sum_{n=1}^{\infty} J_n(\beta') [J_{n-1}(\beta'') - J_{n+1}(\beta'')] \beta \Omega \cos(0,5\Omega \tau_{отн}).$$

В окрестности экстремальной точки  $\tau_{\text{отн}} \rightarrow 0$ , поэтому  $\beta'' \rightarrow 0$ ,  $n = 1$ , а  $\cos(0,5\Omega\tau_{\text{отн}}) \rightarrow 1$ ,  $[J_{n-1}(\beta'') - J_{n+1}(\beta'')] = J_0(\beta'') \rightarrow 1$ . Тогда последнее выражение упрощается и принимает вид  $S_{10}(\tau) = J_1(\beta')\beta\Omega$ .

Отсюда чувствительность, а следовательно, и точность измерения в  $J$ -корреляционном методе пеленгации растут с увеличением произведения  $\beta\Omega$ .

При заданном значении базового расстояния  $B$  максимальное значение модулирующей частоты (при однозначности пеленга) определяется из условия  $\Omega_{\text{max}} = \frac{\pi c}{B}$ . Из этого следует, что выбором базового расстояния определяется максимальная модулирующая частота сигнала зондирования. Уменьшение базового расстояния позволяет использовать более высокую модулирующую частоту в зондирующем сигнале, тем самым повысить крутизну пеленгационной характеристики и тем самым повысить точность измерения. Следовательно, требование повышения точности измерения и однозначности отсчета пеленга достигается применением малобазовой пеленгации или же изменением значения модулирующей частоты. При низкой модулирующей частоте осуществляется грубое определение пеленга, точный отсчет пеленга производится переходом на высокую частоту модуляции. Такой режим работы не требует больших усложнений аппаратуры.

Недостаток метода – исчезновение сигнала в экстремальной точке характеристики. Этот недостаток устраняется в методе максимума, который предложен в [8] и отличается от рассмотренного использованием еще одного дополнительного канала обработки.

### Выводы

Рассмотрен малоизвестный  $J$ -корреляционный метод пеленгации, который в сравнении с широко известным фазовым методом формирует пеленгационную характеристику описываемую функционалом Бесселя первого порядка. Показано, что функционал Бесселя – строго периодическая зависимость. Крутизна пеленгационной характеристики в окрестности экстремальной точки постоянна и пропорциональна индексу модуляции, модулирующей частоте зондирующего сигнала, и при переходе через экстремальную точку крутизна меняет знак на противоположный. Базовое расстояние между антеннами ограничено сверху частотой модуляции зондирующего сигнала. Выбором базового расстояния между антеннами устраняется неоднозначность отсчета пеленга. Точность измерения пеленга не зависит от несущей частоты зондирующего сигнала. Уменьшение базового расстояния между антеннами позволяет повысить точность измерения пеленга.

### Список литературных источников

1. Дымова А.И. Радиотехнические системы / Дымова А.И., Альбац М.Е. Бонч-Бруевич А.М.; под редакцией А.И. Дымовой М.: Сов. Радио. – 1975 – 440с.
2. Финкельштейн М.И. Основы радиолокации / Моисей Ионович Финкельштейн. – [2-е пере раб. и доп.] – М.: Советское радио, 1973. – 536с.
3. Бакулев П.А. Радиолокационные системы: учебник для вузов / Петр Александрович Бакулев. – М.: Радиотехника, 2004, 320с.
4. Лезин Ю.С. Введение в теорию и технику радиотехнических систем: учебное пособие для вузов / Юрий Сергеевич Лезин. – М.: Радио и связь, 1986, 280 с.
5. Сорочан А.Г.  $J$ -корреляционный метод пеленгации / А.Г. Сорочан // Изв. вузов. Радиоэлектроника. – 2001. – №11. – С.57 – 65.
6. Патент 42816 Україна, G01S 3/00. Спосіб вимірювання тимчасової затримки модульованого сигналу при його проходженні окремими каналами розповсюдження та пристрій для його здійснення / Сорочан А.Г., Лігінов С.М., Литвиненко В.І. – №97073670; заявл. 09.07.1997; опубл. 15.11.2001, – Бюл. № 10.
7. Сорочан А.Г. Отношение сигнал/шум опорного сигнала в  $J$ -корреляционном методе пеленгации / А.Г. Сорочан // Изв. вузов. Радиоэлектроника. – 2002. – № 8 – С. 54-58.
8. Патент 42067 Україна, G01S 3/00 Спосіб вимірювання відносної часової затримки сигналу з кутовою модуляцією при його проходженні роздільними каналами розповсюдження і пристрій для його здійснення / Сорочан А.Г., Лігінов С.М., Литвиненко В.І. – №97125743; заявл. 01.12.1997; опубл. 15.10.1997, Бюл. № 9.