

## ВОЗМОЖНОСТИ ПЕЛЕНГАЦИИ СЛОЖНЫХ ЦЕЛЕЙ ПО УГЛОВЫМ КООРДИНАТАМ

д.т.н., проф. В.Д. Карлов, А.В. Челпанов, О.Я. Луковский,  
К.П. Квиткин, В.В. Гаврилкин

*Рассматриваются возможности использования когерентных последовательностей радиоимпульсов для повышения точности измерения координат одиночной цели в моноимпульсной РЛС, а также разрешения элементов сложных целей с оценкой их углового положения.*

**Введение.** Для измерения угловых координат целей и сопровождения по угловым координатам, например, по углу места  $\varepsilon$ , используются, как правило, амплитудные, фазовые и комплексные (амплитудно-фазовые) моноимпульсные системы [1].

В фазовом пеленгаторе информация об угле места цели содержится в разности фаз эхо-сигналов  $\Delta\varphi$ , принимаемых разнесёнными антеннами:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \varepsilon, \quad (1)$$

где  $d$  – разнос между фазовыми центрами антенн;  $\lambda$  – длина волны.

Одним из недостатков фазового пеленгатора является неоднозначность отсчёта угловой координаты вне диапазона  $\Delta\varepsilon_0$ , когда  $\Delta\varphi > 2\pi$ .

В амплитудном пеленгаторе информация об угловом положении цели заключается в соотношении амплитуд сигналов двух приёмных каналов моноимпульсной системы

$$\frac{|U_1|}{|U_2|} = \frac{|A \exp(j\varphi) * F_1(\varepsilon)|}{|A \exp(j\varphi) * F_2(\varepsilon)|} = \frac{F_1(\varepsilon)}{F_2(\varepsilon)} = \frac{F(\varepsilon - \varepsilon_0)}{F(\varepsilon + \varepsilon_0)}, \quad (2)$$

где  $F_1(\varepsilon)$ ,  $F_2(\varepsilon)$  – амплитудные диаграммы направленности по углу места,  $\varepsilon_0$  – равносигнальное направление.

В комплексном пеленгаторе используются как амплитудные, так и фазовые соотношения, принятых эхо-сигналов. Например, фазовый отсчёт может использоваться для точного, но неоднозначного измерения, а амплитудный – для более грубого, но однозначного измерения угловой координаты.

На точность измерения угловых координат целей влияют различные факторы, к ним следует отнести в первую очередь амплитудные и фазо-

вые флуктуации эхо-сигналов на трассе распространения радиоволн и в устройствах обработки, а также флуктуации угла прихода эхо-сигналов цели (угловой шум).

Появление углового шума характерно в первую очередь для сложных целей, когда имеют место изменения наклона фазового фронта волны.

Для целей, состоящих из  $N$  элементов, суммарный эхо-сигнал представляет собой векторную сумму из  $N$  сигналов амплитудами  $A_i$  и фазами  $\varphi_i$ :

$$A_c = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^N A_i \sin \varphi_i\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^N A_i \cos \varphi_i\right)^2}; \quad \varphi_c = \arctg \frac{\sum_{i=1}^N A_i \sin \varphi_i}{\sum_{i=1}^N A_i \cos \varphi_i}, \quad (3)$$

где  $A_c$ ,  $\varphi_c$  – соответственно амплитуда и фаза суммарного сигнала.

Можно записать для градиента фазы, который совпадает с направлением нормали к фазовому фронту:

$$\text{grad } \varphi_c = \frac{\delta \varphi_c}{\delta \varphi_r} e_r + \frac{1}{R} \frac{\delta \varphi_c}{\delta \varphi_\alpha} e_\alpha, \quad (4)$$

где  $e_r$ ,  $e_\alpha$  – орты координатных направлений в полярной системе координат (по дальности  $r$  и углу  $\alpha$ ).

В полярной системе координат

$$\varphi_c(r, \alpha) = \frac{4\pi}{\lambda} R + \varphi_1, \quad (5)$$

где  $R$  – дальность до цели;  $\varphi_1$  – фазовый угол, обусловленный линейным размером сложной цели ( $L$ ).

В качестве примера рассмотрим ошибки пеленгования для двухэлементной цели.

Угловая ( $\varphi_k$ ) и линейная ( $\Delta L$ ) ошибки в определении координат центра сложной цели (СЦ) определяются следующим образом [2]:

$$\text{tg} \varphi_k = \frac{1}{R} \frac{\frac{\delta \varphi_c}{\delta \alpha}}{\frac{\delta \varphi_c}{\delta r}} = \frac{L \cos \alpha_0}{2R} \frac{A_2^2 - A_1^2}{A_2^2 + 2A_1 A_2 \cos \xi + A_1^2}; \quad (6)$$

$$\Delta L = R \text{tg} \varphi_k, \quad (7)$$

где  $\xi$  – разность хода эхо-сигналов от элементов СЦ:

$$\xi = \frac{4\pi}{\lambda} L \sin \alpha_0 + \Delta \varphi_0;$$

$\Delta \varphi_0$  – разность начальных фаз эхо-сигналов от элементов СЦ;  $A_1$ ,  $A_2$  – амплитуды эхо-сигналов от элементов СЦ;  $L$  – линейный размер СЦ;  $\alpha_0$  – угол, под которым наблюдается двухточечная цель.

В общем случае кажущийся центр СЦ по угловой координате (измеренное значение) может отличаться от её геометрического центра, причём на величину, большую углового размера сложной цели. Ошибка в определении углового положения СЦ зависит от соотношения амплитуд и фаз эхо-сигналов элементов СЦ и будет максимальной, если сигналы одинаковы по амплитуде и противофазны. Типовое распределение ошибки пеленга по угловой координате относительно углового размера СЦ для соотношения амплитуд сигналов  $\mu = 1$  и  $\mu = 2$  приведены на рис. 1.

Если элементы СЦ не разрешаются по дальности и угловым координатам, разрешение может быть проведено по радиальной скорости с использованием когерентной последовательности из  $N$  радиоимпульсов с периодом следования  $T$ .

Для пачки когерентных радиоимпульсов автокорреляционная функция (АКФ), которая определяет разрешающую способность по частоте Доплера (т.е. по радиальной скорости) включает две составляющие – АКФ одиночного сигнала  $\psi_0$  и АКФ последовательности импульсов  $\psi_N$ :

$$\Psi_{(\tau, F)} = \Psi_{0(\tau, F)} \cdot \Psi_{N(\tau, F)}, \quad (8)$$

где  $\Psi_{0(\tau, F)} = \frac{\sin \pi F(\tau_n - |\tau|)}{\pi F \tau_n}$ , при  $|\tau| < \tau_n$ ;

$$\Psi_{N(\tau, F)} = \frac{\sin[\pi F(N - |i|)\pi FT]}{N \sin \pi FT} \delta(\tau - iT), \text{ при } |i| \leq N,$$

$\tau_n$  – длительность импульса эхо-сигнала;  $\tau$  – время задержки, определяемое дальностью до цели;  $F$  – значение рассогласования по частоте Доплера;  $i = E\left[\frac{\tau}{T}\right]$ ,  $E[\cdot]$  – целая часть числа  $[\cdot]$ .

В данном случае разрешающая способность по радиальной скорости  $\delta \dot{R}$  увеличивается в  $N$  раз по сравнению с одиночным сигналом:

$$\delta \dot{R} = \frac{\lambda}{2NT}. \quad (9)$$

Далее рассмотрим метод обработки когерентных последовательностей радиоимпульсов и получения информации об угловом положении целей.

Обработка осуществляется параллельно по двум приёмным угловым местным каналам. При этом измеряются значения амплитуды  $A_i$  и фазы  $\varphi_i$  по каждому из  $i = 1, 2, \dots, N$  эхо-сигналам в каждом канале, то есть  $\varphi_{1i}, A_{1i}, \varphi_{2i}, A_{2i}$ .

Разностные значения фазы и амплитуды сигналов двух приёмных каналов в каждом тракте будут определять положением целей по углу

места относительно равносигнального направления  $\varepsilon_0$  приёмных диаграмм направленности (ДН).

В свою очередь, последовательность значений фазы сигналов от такта к такту определяются параметрами траектории цели по дальности ( $R_0$  и  $\dot{R}$ ):

$$R_i = R_0 + \dot{R}(i-1)T.$$

Далее осуществляется корреляционная обработка амплитудно-фазовой информации, при которой каждая из двух последовательностей измеренных значений фазы  $\varphi_{1i}, \varphi_{2i}$  сравнивается с набором из  $M$  опорных (эталонных) функций фазы  $\varphi_{опij}$ , где  $j = 1, 2, \dots, M$ .

При этом оцениваются значения радиальной скорости и параметры  $\varphi_0$  и  $\dot{\varphi}$  угломестной функции фазы по каждому приёмному каналу:

$$\varphi_{1(t)} = \hat{\varphi}_{01} + \hat{\varphi}_1 t; \quad \varphi_{2(t)} = \hat{\varphi}_{02} + \hat{\varphi}_2 t. \quad (10)$$

Сравнение производится путём вычисления  $M$  значений корреляционного интеграла

$$\Phi_j = \frac{1}{N} \sqrt{\left[ \sum_{i=1}^N A_i \sin(\varphi_i - \varphi_{опij}) \right]^2 + \left[ \sum_{i=1}^N A_i \cos(\varphi_i - \varphi_{опij}) \right]^2}, \quad (11)$$

где  $A_i, \varphi_i$  – измеренные значения амплитуды и фазы для данного канала;  $\varphi_{опij}$  – значения  $j$ -й опорной функции фазы;

$$\varphi_{опij} = \frac{4\pi}{\lambda} \dot{R}_j \tau_i = \dot{\varphi}_j \tau_i; \quad \tau_i = \left( i - \frac{N-1}{2} \right) T. \quad (12)$$

Дискретность изменения параметра  $\dot{R}_j$  опорных функций фазы определяется разрешающей способностью по радиальной скорости (9), а пределы изменения – диапазоном однозначного измерения радиальной скорости  $\Delta \dot{R}_0$ :

$$\Delta \dot{R} = \frac{\lambda}{2T}. \quad (13)$$

Следовательно, число опорных функций будет равно:

$$M = \frac{\Delta \dot{R}_0}{\delta \dot{R}} = N.$$

За оценку радиальной скорости  $\dot{R}$  принимают параметр  $\dot{R}_k$ -й ( $k$ -й) опорной функции, при сравнении которой получено максимальное значение корреляционного интеграла:

$$\Phi_k = \max_j \{\Phi_j\}.$$

По значению оценки  $\hat{R}$  в соответствии с (12) определяется оценка угла наклона фазовой характеристики (определяемой радиальной скоростью цели)  $\hat{\varphi}$ .

Значения оценки параметра  $\hat{\varphi}_0$  определяются в соответствии с формулой

$$\hat{\varphi}_0 = \arctg \frac{\sum_{i=1}^N \sin(\varphi_i - \hat{\varphi}\tau_i)}{\sum_{i=1}^N \cos(\varphi_i - \hat{\varphi}\tau_i)}. \quad (14)$$

Величина  $\hat{\varphi}_0$  соответствует постоянной составляющей функции соответствующего угломестного канала (10).

Используя оценки параметров по двум каналам, можно определить параметры разностной (угломестной фазы):

$$\Delta\hat{\varphi}_0 = \hat{\varphi}_{01} - \hat{\varphi}_{02}; \quad \Delta\hat{\varphi} = \hat{\varphi}_1 - \hat{\varphi}_2. \quad (15)$$

Оценки  $\Delta\hat{\varphi}_0$  и  $\Delta\hat{\varphi}$  определяются соответственно угловым положением  $\epsilon_{ц}$  и скоростью изменения угла места цели  $\dot{\epsilon}_{ц}$ .

Далее, в соответствии с (1) вычисляются значения угла места цели.

Данный метод получить более точную, по сравнению с единичными замерами, оценку угломестной координаты для одиночной цели. В случае сложной цели более точно определяется угол места геометрического центра СЦ за счёт усреднения замеров при построении фазовой траектории по когерентной пачке импульсов.

Кроме того, можно использовать более высокую разрешающую способность когерентной пачки импульсов по радиальной скорости для выделения элементов СЦ и оценки их углового положения в пределах приёмных ДН (рис. 2).

Для этого проводится анализ функций неопределённости, составленных из значений корреляционного интеграла  $\Phi_j$ .

В случае СЦ имеют место локальные максимумы данной функции, соответствующие значениям радиальной скорости элементов СЦ.

На рис. 3 а, б приведены функции неопределённости соответственно для 1-го и 2-го угломестных каналов обработки для случая, когда СЦ состоит из трёх элементов.

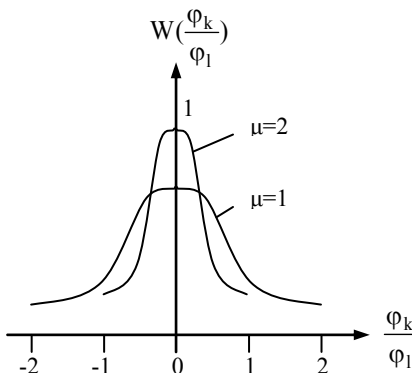


Рис. 1. Распределение ошибки пеленга

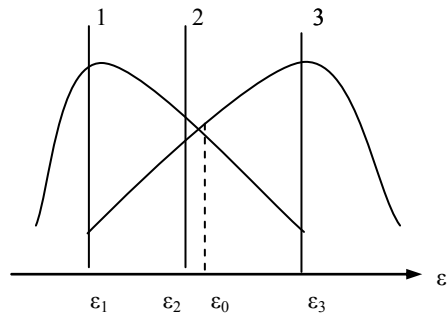
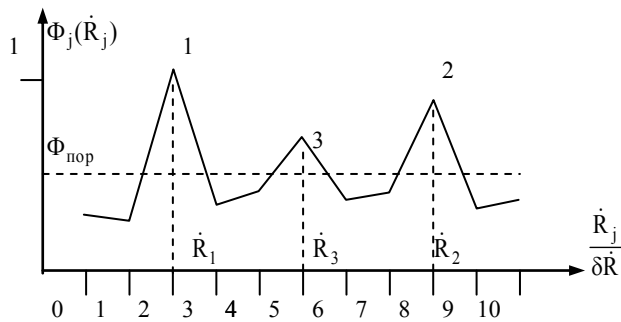
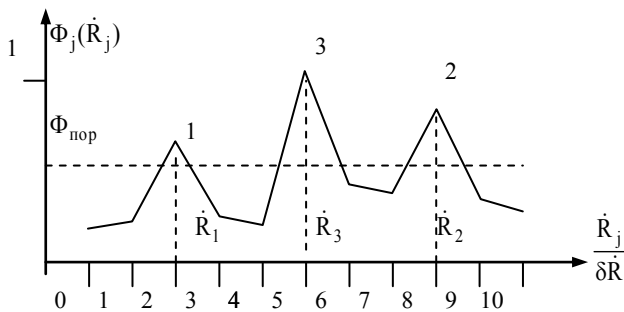


Рис. 2. Оценка углового положения элементов СЦ



а



б

Рис. 3. Функции неопределённости для 1-го (а) и 2-го (б) угломестных каналов

Положение пиков функции неопределённости соответствует значениям радиальной скорости элементов СЦ  $\dot{R}_1$ ,  $\dot{R}_2$  и  $\dot{R}_3$  в пределах диапазона однозначности  $\Delta\dot{R}_0$  (13). Очевидно, они будут совпадать для обоих угломестных каналов. Амплитуда этих пиков будет определяться как степень соответствия функций фазы эхо-сигналов  $\Phi_i$  и одной из опорных функций  $\Phi_{опij}$ , так и положением элементов СЦ в пределах диаграммы направленности по углу места относительно равносигнального направления (рис. 2).

Первая составляющая амплитуды будет одинаковой для обоих угломестных каналов. Следовательно, положение целей относительно равносигнального направления можно оценить по соотношению амплитуд локальных максимумов  $\Phi_j$  для двух угломестных каналов.

Из рис. 2 и 3 видно, что для первой цели максимум  $\Phi_j$  будет в 1-м угломестном канале, для третьей – во 2-м, а для второй цели, находящейся вблизи равносигнального направления  $\epsilon_0$ , амплитуды  $\Phi_j$  в обоих каналах будут примерно одинаковы.

**Вывод.** Таким образом, использование когерентных пачек импульсов в моноимпульсной системе позволяет не только повысить точность определения угловых координат одиночных целей, но и обеспечить разрешение элементов сложной цели с оценкой их углового положения в пределах диаграммы направленности.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Леонов А.И., Фомичев К.И. Моноимпульсная радиолокация. – М.: Радио и связь, 1984. – 312 с.*
2. *Островитянов Р.В., Басалов Ф.А. Статистическая теория радиолокации протяжённых целей. – М.: Радио и связь, 1982. – 232 с.*

*Поступила 2.11.2004*

**КАРЛОВ Владимир Дмитриевич**, доктор техн. наук, профессор, начальник кафедры Харьковского университета Воздушных Сил. Окончил ВИРТА в 1968 году. Область научных интересов – радиолокация и радионавигация.

**ЛУКОВСКИЙ Олег Ярославович**, адъюнкт очной адъюнктуры при Харьковском университете Воздушных Сил. Область научных интересов – радиолокация и радионавигация.

**КВИТКИН Константин Петрович**, адъюнкт Харьковского университета Воздушных Сил. Область научных интересов – радиолокация и радионавигация.

**ГАВРИЛКИН Владимир Вильевич**, командир воинской части. Область научных интересов – радиолокация и радионавигация.

**ЧЕЛПАНОВ Артём Владимирович**, курсант Харьковского университета Воздуш-

*ных Сил.*