

УДК 621.396.96

## ДАЛЬНОСТНО-«КВАЗИУГЛОВЫЕ» РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ ПОРТРЕТЫ В АМПЛИТУДНОМ МОНОИМПУЛЬСНОМ ПЕЛЕНГАТОРЕ

К. т. н. С. А. Горшков, к. т. н. С. Ю. Седышев, Е. Н. Буйлов

Военная академия Республики Беларусь  
Республика Беларусь, г. Минск  
sedbox@mail.ru

*Обсуждаются принципы получения дальностно-«квазиугловых» радиолокационных портретов в амплитудном моноимпульсном пеленгаторе, где суммарно-разностная обработка реализуется не на сверхвысокой частоте, а на видеочастоте при цифровой обработке сигнала. Представлены результаты математического моделирования радиолокационных портретов цели.*

*Ключевые слова: амплитудный моноимпульсный пеленгатор, дальностный радиолокационный портрет, дальностно-«квазиугловой» радиолокационный портрет.*

Повышение мерности радиолокационных портретов (РЛП) целей (разрешение по радиальной дальности, частоте Доплера, угловым координатам и т. д.) приводит к повышению качества распознавания их классов [1].

В настоящее время известны различные варианты РЛП, в том числе и комбинированные, которые учитывают высокие разрешающие способности по совокупности различных координат. Повышение разрешающей способности по дальности и частоте Доплера возможно за счет расширения спектра сигнала и увеличения времени наблюдения. Получение угломерных портретов возможно за счет высокой разрешающей способности по угловым координатам (УК) при прямом или обратном синтезе апертуры антенны. Разрешение по УК определяется углом поворота цели относительно направления на радиолокационную станцию (РЛС) за время синтезирования [2]. Однако получение таких РЛП требует большого времени накопления отраженного сигнала (от сотен миллисекунд до единиц, десятков секунд). В то же время, при высокой разрешающей способности по дальности можно получать дальностный РЛП (Д РЛП) с одновременной оценкой УК каждой блестящей точки (БТ) и пересчетом ее в поперечное смещение. В данном случае это позволяет переходить от Д РЛП целей к дальностно-«квазиугловым» РЛП (ДКУ РЛП) [3].

Данный доклад является развитием единственной опубликованной работы по данной тематике, имеющейся в литературе [3]. Здесь рассматриваются вопросы по методам получения ДКУ РЛП для математической модели неподвижной цели, состоящей из трех БТ. В качестве УК рассматривается азимут.

### Принципы получения ДКУ РЛП

Для формирования Д РЛП необходимо излучать и принимать широкополосные зондирующие сигналы, позволяющие разрешать отдельные элементы конструкции цели по дальности. Высокое разрешение по данной координате достигается за счет расширения спектра сигнала.

В четырехрупорном амплитудном моноимпульсном пеленгаторе (АМП) УК определяются путем вычитания выходных сигналов одних пар рупоров из других. Высокая точность угловых измерений достигается при большом отношении сигнал/шум (ОСШ) на небольших дистанциях [4]. Таким образом, при высокой разрешающей способности по дальности и значительном ОСШ возможно получать ДКУ РЛП. В этих условиях может решаться задача распознавания не только классов целей, но и их конкретных типов [5].

В случае попадания в один элемент разрешения нескольких БТ наблюдаются флуктуации углового положения поперечного смещения (ПС) данного элемента разрешения по дальности. Эти флуктуации вызываются блужданием радиолокационного центра вторичного излучения цели по УК, которые приводят к затруднению решения задач распознавания. При этом УК радиолокационного центра уточняются достаточно большим числом измерений [3].

Основные принципы получения многомерных ДКУ РЛП целей путем определения математического ожидания и среднеквадратического отклонения (СКО) оценок УК разрешаемых по дальности БТ, можно изложить следующим образом.

1. Осуществить непрерывное сопровождение цели, где равносигнальное направление (РСН) ориентировано на одну из БТ.

2. Измерить УК каждой БТ цели относительно РСН.

3. Пересчитать математическое ожидание (МО) оценок УК  $m_{\beta M}$ ,  $m_{\epsilon M}$   $M$ -й БТ в соответствующие поперечные размеры  $m_{Z_M}$ ,  $m_{Y_M}$  в картинной плоскости с учетом дальности до цели  $r_{ц}$  и ее малых угловых размеров  $m_{Z_M} \cong r_{ц} m_{\beta M}$ ,  $m_{Y_M} \cong r_{ц} m_{\epsilon M}$ . Математическое ожидание оценок УК находятся путем их усреднения.

4. Среднеквадратическое отклонение оценок ПС  $\Delta L_{\beta}$ ,  $\Delta L_{\epsilon}$  разрешенных по дальности БТ в картинной плоскости будет определяться соответствующими ошибками измерения УК относительно РСН  $\sigma_{\theta}$  и расстоянием до цели:  $\Delta L_{\beta} \cong r_{ц} \sigma_{\beta}$ ,  $\Delta L_{\epsilon} \cong r_{ц} \sigma_{\epsilon}$ .

Значения  $\Delta L_{\beta}$  и  $\Delta L_{\epsilon}$  можно рассматривать в данном случае как некоторый эквивалент меры разрешающей способности РЛС по соответствующей координате картинной плоскости.

Таким образом, дальности получения ДКУ РЛП целей предложенным способом могут составлять от сотен метров до единиц километров, что может быть актуально, например, для бортовых РЛС, РЛС разведки наземных объектов и головок самонаведения.

Для получения высокого разрешения по радиальной дальности возможно использование корреляционно-фильтрового способа обработки с полной частотной демодуляцией [6]. Полная частотная демодуляция отраженного многочастотного сигнала переводит дальностные различия между целями в частотные. Сжатие сигнала производится в анализаторе спектра (методом БПФ — быстрого преобразования Фурье). При этом частотный сдвиг между узкополосными фильтрами анализатора эквивалентен дальностному сдвигу.

Выходное БПФ заданной размерности вычисляет огибающую сжатых широкополосных сигналов (ШПС) в пределах окна наблюдаемых дальностей, ограниченного величиной, обратно пропорциональной величине скачка частоты. Для уточнения формы огибающей Д РЛП целей возможно увеличение размерности БПФ путем дополнения нулями.

Необходимо отметить, что комплексная огибающая выходных сигналов фильтров БПФ, относящихся к анализируемому дискрету дальности, полностью определяет распределение мощности отраженного сигнала по частоте. Можно показать, что при зондировании пространства наблюдения импульсами с линейной частотной модуляцией происходит рассовмещение по частоте выходных сигналов фильтров БПФ. Данные частотные сдвиги обусловлены распределением по радиальной дальности областей локального отражения цели.

### Результаты математического моделирования

В ходе математического моделирования рассматривался вопрос получения ДКУ РЛП для эталонной цели, состоящей из трех БТ, при фиксированных ракурсах наблюдения в горизонтальной плоскости. При этом использовались следующие исходные данные: ширина ДНА по УК  $\Delta \epsilon = \Delta \nu = 2$  град; ОСШ на выходе устройства ВПО  $\gamma = 500$ ; число приемо-передающих каналов — 4; вид зондирующего сигнала — последовательность простых прямоугольных радиоимпульсов со ступенчатым законом изменения частоты; длительность одного частотного дискрета  $T_{д} = 100$  нс; период повторения дискретов  $T_{пд} \approx 34$  мкс; скачок частоты  $\Delta f_{д} = 10$  МГц; число радиоимпульсов  $N_{д} = 30$ ; ширина спектра сигнала  $\Delta f_{с} = 300$  МГц; число отсчетов БПФ  $N_{БПФ} = 128$ ; число независимых реализаций принятого сигнала, используемых для получения статистических оценок  $N = 400$ .

Под принятой реализацией понимается принятый сигнал с нефлуктуирующей амплитудой и случайной начальной фазой на фоне шума при  $\gamma = 27$  дБ.

В качестве цели использовалась модель, состоящая из трех БТ со следующими параметрами: эффективная отражающая поверхность (ЭОП) БТ  $y_{БТ1} = y_{БТ2} = y_{БТ3} = 1 \text{ м}^2$ ; радиальная дальность до БТ  $r_{БТ1} = 987$  м,  $r_{БТ2} = 990$  м,  $r_{БТ3} = 993$  м; расстояние между БТ  $\Delta r_{БТ12} = \Delta r_{БТ23} = 3$  м; ракурс наблю-

дения цели в горизонтальной плоскости  $\varphi$  (в дальнейшем — ракурс цели) — угол между РСН антенны и вектором скорости цели в горизонтальной плоскости.

На рис. 1 представлен Д РЛП модели цели с ракурсом наблюдения  $\varphi = 0^\circ$ . По горизонтальной оси указан номер элемента дальности, а по вертикальной — результат статистического усреднения квадрата модуля комплексной амплитуды суммарного сигнала  $\overline{Z_{\Sigma i}}$ .

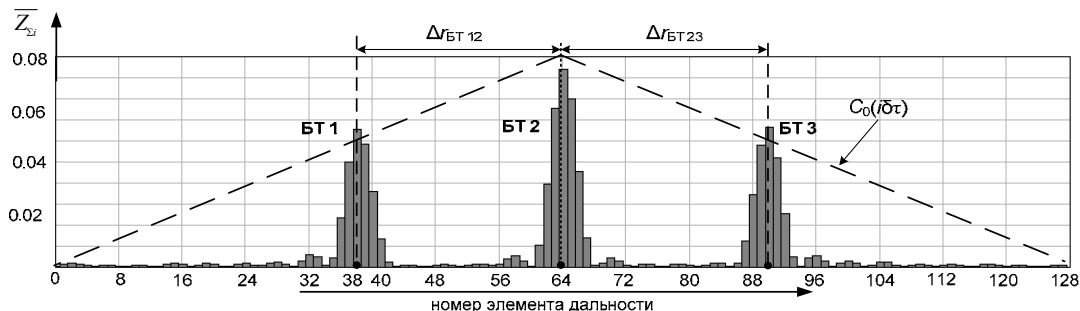


Рис. 1. Д РЛП модели цели амплитудного моноимпульсного пеленгатора

Из рисунка следует, что при  $\varphi = 0^\circ$  БТ цели разрешаются по дальности. Расстояние между элементами дальности Д РЛП определяется в соответствии с выражением:  $\Delta r_{\text{эл}} = \frac{cT_d}{2N_d}$ , где  $c$  — скорость света в вакууме [7]. Расстояние между БТ Д РЛП  $\Delta r_{\text{БТ}}$  находится по выражению:  $\Delta r_{\text{БТ}} = (N_{r_{\text{БТ}2}} - N_{r_{\text{БТ}1}})\Delta r_{\text{эл}}$ , где  $N_{r_{\text{БТ}}}$  — номер элемента дальности нахождения БТ.

Определим, например, расстояние между первой и второй БТ при  $N_d = 128$ :

$\Delta r_{\text{БТ}12} = (N_{r_{\text{БТ}2}} - N_{r_{\text{БТ}1}}) \frac{cT_d}{2N_d} = (64 - 38) \cdot \frac{3 \cdot 10^8 \cdot 100 \cdot 10^{-9}}{2 \cdot 128} \approx 3 \text{ м}$ , что соответствует исходному расстоянию между БТ.

Разница усредненных амплитуд БТ объясняется тем, что огибающая Д РЛП в окне дальности размером  $cT_d/2$  имеет треугольную форму с максимумом в центре окна. Эта огибающая определяется формой корреляционной функции одиночного радиоимпульса  $C_0(i\delta\tau)$ .

На рис. 2, а представлен ДКУ РЛП модели цели при  $\varphi = 0^\circ$ . На одной из горизонтальных осей отображаются значения номера элемента дальности  $N_i$ , по другой горизонтальной оси — ПС каждой БТ  $\Delta L_{\beta i}$ , а по вертикальной оси —  $\overline{Z_{\Sigma i}}$ . Отражения от каждой БТ представляются двумерной гауссовской огибающей, ширина которой вдоль оси  $\Delta L_{\beta i}$  соответствует СКО оценок ПС в картинной плоскости  $\sigma_{L_i}$ , а вдоль оси  $N_i$  — СКО «блуждания» максимума БТ по элементам дальности  $y_{X_i}$ . Данный РЛП цели получен путем статистического усреднения принятого сигнала по множеству реализаций.

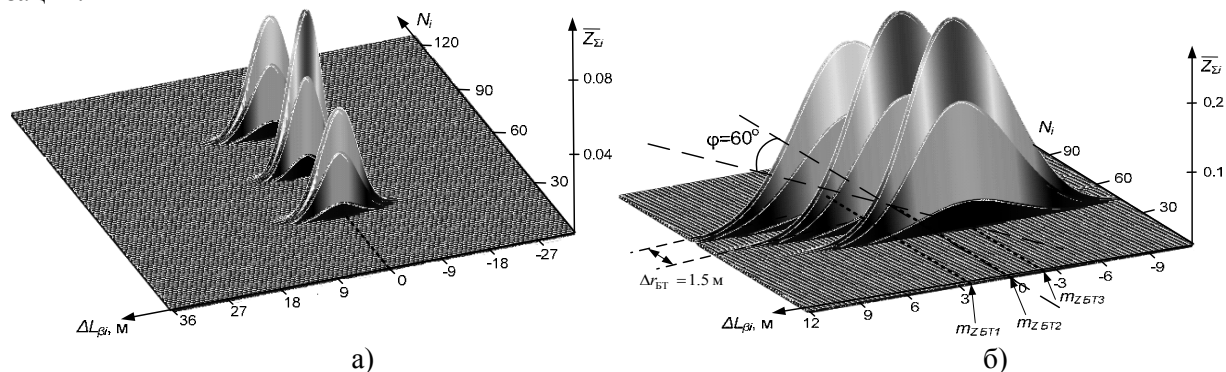


Рис. 2. ДКУ РЛП модели цели при  $\varphi = 0^\circ$  (а) и при  $\varphi = 60^\circ$  (б)

Из рис. 2, а следует, что при  $\varphi = 0^\circ$  МО оценок ПС БТ  $m_{Z_{\text{БТ1-БТ3}}} \approx 0$  м, а СКО оценок ПС  $\sigma_{L_{\text{БТ1-БТ3}}} \approx 3$  м.

На рис. 2, б представлен ДКУ РЛП модели цели с двухмерной гауссовской огибающей при ракурсе наблюдения  $\psi = 60^\circ$ . Из рисунка следует, что при  $\psi = 60^\circ$  МО оценок ПС БТ  $m_{Z_{\text{БТ1}}} \approx -2,5$  м,  $m_{Z_{\text{БТ2}}} \approx 0$  м,  $m_{Z_{\text{БТ3}}} \approx 2,5$  м, а их СКО  $\sigma_{L_{\text{БТ1-БТ3}}} \approx 3$  м.

При ракурсе наблюдения  $\psi = 90^\circ$  все БТ сливаются в одну и МО оценок ПС  $m_{Z_{\text{БТ1-БТ3}}} \approx 0$  м, а их СКО  $\sigma_{L_{\text{БТ2}}} \approx 4,5$  м. Увеличение СКО ошибок обусловлено влиянием появляющегося поперечного шума цели, так как при данном ракурсе наблюдения цели все БТ попадают в один элемент разрешения по дальности.

### Заключение

При высокой разрешающей способности по радиальной дальности в амплитудном моноимпульсном пеленгаторе появляется возможность измерения взаимно разнесенных по дальности УК БТ и формирования ДКУ РЛП.

Полученные ДКУ РЛП цели для разных ракурсов наблюдения цели показывают, что каждому элементу дальности соответствует своя комплексная амплитуда сигнала, и отражения от каждой БТ представляются двухмерной гауссовской огибающей, ширина которой вдоль оси соответствует СКО оценок ПС в картинной плоскости  $\sigma_{L_i}$ , а вдоль оси  $N_i$  – СКО «блуждания» максимума БТ по элементам дальности.

Дальности получения ДКУ РЛП целей предложенным способом могут составлять от сотен метров до единиц километров, что может быть актуально, например, для бортовых РЛС, РЛС разведки наземных объектов и радиолокационных прицелов артиллерийского или стрелкового вооружения. Несмотря на ряд ограничений на получение таких РЛП и, в первую очередь, ограничение по дальности, ДКУ РЛП целей могут быть использованы для решения задач распознавания.

### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Охрименко А. Е. Основы извлечения, обработки и передачи информации. Ч. 3. Распознавание-различение сигналов.— Мн.: БГУИР, 1995.
2. Ширман Я. Д., Горшков С. А., Лещенко С. П., Братченко Г. Д. // Радиолокационное распознавание. Учебное пособие по курсу «Теоретические основы радиолокации».— Харьков, 1994.
3. Лещенко С. П., Горшков С. А., Ширман Я. Д. Принцип получения двумерных радиолокационных изображений при недостаточном азимутальном разрешении // Радиотехника и радиоэлектроника.— 1991.— Т. 36, Вып. 8.— С. 1595—1597.
4. Справочник по радиолокации. В 4-х томах / Том 4. Радиолокационные станции и системы / Под ред. М. М. Вейсбейна. Москва, Сов. радио, 1978.
5. Радиоэлектронные системы: Основы построения и теория. Справочник. / Под ред. Я. Д. Ширмана.— Москва: Радиотехника, 2007.
6. Ширман Я. Д., Манжос В. Н. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех.— Москва: Радио и связь, 1981.
7. Donald R. Wehner. High-Resolution Radar. London: Artech House Boston, 1994.

S. A. Gorshkov, S. Y. Sedishev, E. N. Builov

### Range-quasiangle radar-tracking portraits in the peak monopulse direction finder.

The paper discusses the principles of range-quasiangle radiolocation portrait receiving in peak monopulse direction finder, where summary-differential processing is carried out not at super high frequency but at video frequency with digital signal processing. The results of radiolocation portrait mathematical modeling are shown.

Keywords: *peak monopulse direction finder, range radar-tracking portraits, range-quasiangle radar-tracking portraits.*