УДК 681.396.96 : 681.32

В.Д. Карлов[1], О.Я. Луковский[1], А.Е. Присяжный[1], А.В. Челпанов[2], В.В. Гаврилкин[3]

[1]*Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба*
[2] *в/ч А-0826;* [3] *в/ч А-2275*

ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ СОПРОВОЖДЕНИЯ СЛОЖНЫХ ЦЕЛЕЙ В ФАЗОВОЙ МОНОИМПУЛЬСНОЙ РЛС

Рассматриваются возможности повышения точности определения параметров движения сложных целей в фазовой моноимпульсной РЛС на основных этапах обработки информации – при формировании параметров опорных точек и их фильтрации.

эффективность сопровождения, сложные цели, фазовая многоимпульсная РЛС

Введение

Постановка проблемы. При сопровождении сложных целей (СЦ) возникают ошибки, обусловленные изменяющейся структурой СЦ и соответствующими флуктуациями параметров эхо-сигналов, которые могут значительно превышать стандартные ошибки измерения. В связи с этим необходима разработка методов получения и обработки радиолокационной информации, позволяющих компенсировать или уменьшать ошибки, обусловленные структурой СЦ.

Анализ литературы. В [1, 2] получены основные соотношения, характеризующие ошибки измерения параметров движения протяженных целей. В [3] рассмотрена возможность снижения флуктуационных ошибок путём частотной модуляции зондирующих сигналов. В [4] предложен переход от сопровождения отдельных элементов СЦ к построению центральной траектории, характеризующей кинематические свойства СЦ.

Цель статьи. Рассмотреть возможность повышения эффективности сопровождения СЦ за счет снижения ошибок формирования параметров опорных точек при изменении несущей частоты зондирующих сигналов и в ходе траекторной обработки при сглаживании замеров угломестной фазы в фазовой моноимпульсной РЛС.

Результаты исследований

В случае СЦ имеют место дополнительные ошибки измерения параметров движения целей. Если элементы СЦ не разрешаются по соответствующим координатам в процессе сопровождения, то за счёт изменения пространственного положения элементов возникают флуктуации отраженных сигналов, так называемые шумы цели, приводящие к ошибкам измерения дальности и угловых координат.

Шумы СЦ в ряде случаев удобно рассматривать как флуктуации её кажущегося центра или точки равновесия относительно геометрического центра СЦ [1]. В частности, точкой равновесия для фазовой моноимпульсной системы является фазовый центр цели, то есть координаты точки для которой эхо-сигналы от всех элементов СЦ находятся в фазе.

Для СЦ характерным является близость радиальной и угловых составляющих скорости её элементов.

При сопровождении СЦ по угловым координатам и дальности целесообразно формирование единой опорной траектории (ЕОТ), то есть определение параметров движения её центра (например, геометрического), и, при необходимости, построение траектории разделяющихся элементов СЦ относительно данной ЕОТ.

Необходимость построения ЕОТ СЦ вызвана следующим. Если элементы СЦ разрешаются по какой либо координате, например, по дальности, то их раздельное сопровождение во-первых, требует значительной загрузки целевых каналов, а во-вторых, может привести к значительным ошибкам оценки параметров траектории при перепутывании траекторий (при попадании нескольких опорных точек в стробы идентификации и их неправильной селекции).

Кроме того, траектория геометрического центра СЦ достаточно хорошо описывает характер её движения. Поэтому далее рассмотрим возможные ошибки в оценке параметров ЕОТ СЦ.

Шумы СЦ (флуктуации информативных параметров эхо-сигналов) возникают за счет интерференции волн отраженных от элементов СЦ, при этом фазовый фронт суммарной волны уже не будет сферическим и нормаль к нему укажет не на геометрический центр, а на так называемый кажущийся центр СЦ.

Величина ошибки пеленга (оценки угловой координаты) будет определяться соотношением амплитуд и фаз эхо-сигналов от элементов СЦ.

Например, для двухэлементной цели относительная ошибка пеленга γ определится как [1]

$$\gamma = \frac{\mathrm{tg}\varphi}{\alpha/2} = \frac{1 - z_e^2}{1 + 2z_e \cdot \cos\psi + z_e^2}, \qquad (1)$$

где φ – ошибка пеленга относительно центра СЦ; α – угловой размер СЦ; z_e – отношение амплитуд эхо-сигналов E_1 и E_2; $z_e = E_1/E_2$; ψ – разность фаз между эхо-сигналами; $\psi = \frac{4\pi}{\lambda}\ell \sin\beta$; ℓ – расстояние между элементами; β – угол наблюдения СЦ.

Как видно из соотношения (1), ошибка пеленга может быть достаточно большой и выходить за пределы сложной цели.

При движении СЦ амплитудные и особенно фазовые соотношения между эхо-сигналами изменяются, поэтому ошибки флуктуируют.

Для многоэлементной цели относительная ошибка пеленга определится как [1]

$$\gamma = \frac{E_в \cdot \cos(\phi_в - \phi_c)}{E_c}, \tag{2}$$

где E_c, ϕ_c – соответственно амплитуда и фаза суммарного сигнала; $E_в, \phi_в$ – амплитуда и фаза квадратурной компоненты вектора эхо-сигнала для определенного направления с учетом структуры СЦ (взаимного расположения её элементов).

Распределение углового шума СЦ относительно её статистического центра характеризуется законом Стьюдента с двумя степенями свободы [2]

$$W_{(\Delta\gamma)} = \frac{\mu}{2\left(1+\mu^2\Delta\gamma^2\right)^{3/2}}, \tag{3}$$

где $\mu = \frac{\delta_c}{\delta_в}$; $\sigma_c, \sigma_в$ – среднеквадратические ошибки (СКО) модуля векторов E_c и $E_в$;

$$\Delta\gamma = \gamma - \bar{\gamma},$$

$\bar{\gamma}$ – среднее значение ошибки пеленга.

Предельное значение ошибки пеленга будет определяться относительной величиной модуля вектора суммарного эхо-сигнала $E_0 = E_c / E_м$ от S элементов СЦ [2]

$$\gamma_{max} = \left(\frac{1}{E_0} - 1\right)\alpha, \tag{4}$$

где

$$E_0 e^{j\varphi_i} = \frac{\sum_{i=1}^{s} A_i e^{j\varphi i}}{\sum_{i=1}^{s} A_i}, \tag{5}$$

α – угловой размер СЦ; A_i – значения амплитуд сигналов; $0 \le E_0 \le 1$.

Из (2) и (4) следует, что между ошибкой пеленга и амплитудой суммарного сигнала существует отрицательная корреляция, при которой меньшим амплитудам соответствуют большие ошибки.

Исходя из (4) видно, что максимальная ошибка пеленга может значительно превышать угловые размеры СЦ.

Далее рассмотрим возможные методы уменьшения пеленгационной ошибки в фазовой моноимпульсной РЛС. К таким методам следует отнести:

1) усреднение замеров в процессе их накопления (при формировании параметров опорных точек сопровождения по угловым координатам);

2) изменение несущей частоты зондирующих сигналов (применение многочастотных сигналов);

3) фильтрацию (сглаживание) опорных точек сопровождения СЦ;

4) селекцию замеров, полученных по сигналам с малой амплитудой (для которых, как было отмечено, характерны значительные пеленгационные ошибки);

5) использование разнесенных радиолокационных систем.

Рассмотрим более подробно возможности реализации некоторых из методов.

Усреднение n замеров значений угломестной фазы при формировании параметров опорных точек. За время проведения серии из n замеров угломестной фазы (в n тактах работы РЛС) структура СЦ (взаимное расположение её элементов) может несколько изменяться, при этом соответственно изменяются величина и, возможно, знак ошибки пеленга. Поэтому усреднение единичных замеров может повысить точность формирования параметров опорных точек (значений угломестной фазы). Кроме того, усреднение необходимо, если спектр флуктуаций угломестной фазы для СЦ превышает полосу пропускания следящей системы пеленгатора. Единичные измерения значений разностной угломерной фазы $\Delta\varphi_i$ в зависимости от угла места СЦ ε определяются, как

$$\Delta\varphi_i = \frac{2\pi d}{\lambda}\sin\varepsilon_i, \tag{6}$$

где d – расстояние между фазовыми центрами антенн моноимпульсной РЛС; λ – длина волны.

Диапазон однозначного измерения угла места $\Delta\varepsilon_0$ определится для $\Delta\varphi = 0\ldots2\pi$:

$$\varepsilon = \arcsin\frac{\lambda\Delta\varphi}{2\pi d}; \tag{7}$$

$$\Delta\varepsilon_0 = \arcsin\frac{\lambda}{d}. \tag{8}$$

Усреднение серии из n фазовых измерений осуществляется в соответствии с выражением

$$\phi = \arcsin\frac{\sum_{i=1}^{n} A_i \sin\Delta\varphi_i}{\sum_{i=1}^{n} A_i \cos\Delta\varphi_i}, \tag{9}$$

где A_i – значения амплитуд сигналов.

Значения амплитуды учитываются как веса измерений, с учётом того, что имеет место отрицательная корреляция между амплитудой суммарного эхо-сигнала от СЦ и значением ошибки пеленгации.

Эффективность усреднения увеличивается, если за счёт разлета элементов СЦ за время накопления единичных замеров изменение фазы вектора суммарного сигнала будет больше 2π. Учитывая некогерентность обработки, можно ожидать уменьшения ошибки оценки угломестной фазы на основе усреднения n замеров в $\sqrt{n}$ раз.

Изменение несущей частоты зондирующих сигналов. Переключение несущей частоты зондирующих сигналов при формировании параметров опорных точек изменяет возможные неблагоприятные фазовые соотношения эхо-сигналов от элементов СЦ. Поэтому последующее усреднение или выбор опорных точек с максимальной амплитудой даёт возможность уменьшить ошибки пеленга.

Эффективность усреднения с изменением несущей частоты определяется рядом факторов, основными из которых является структура СЦ и диапазон перестройки частоты.

Для получения эффективного усреднения необходимо, чтобы изменение частоты обеспечивало некоррелированность флуктуаций ошибки пеленга на каждой из частот.

Достаточно удовлетворительное усреднение получим, если дополнительный набег фазы эхо-сигналов от элементов СЦ $\delta\varphi$ за счет изменения частоты Δf будет более 2π

$$\delta\varphi = 2\pi \cdot \Delta\varphi \cdot \frac{2\Delta R}{C} \geq 2\pi, \qquad (10)$$

где ΔR – усредненная разность расстояний до элементов СЦ.

Следовательно, необходимо обеспечить

$$\Delta f \geq \frac{C}{2\Delta R} = \frac{150}{2\Delta R}, \qquad (11)$$

где ΔR – в метрах, а Δf – в МГц.

Результаты моделирования показывают [3], что относительное уменьшение среднеквадратических ошибок пеленга при использовании различных несущих частот за счет усреднения замеров при $\delta\varphi \geq 2\pi$ составляет величину $\frac{\sigma_y}{\sigma_i} \leq 0{,}2$.

При этом эффективность усреднения выше для СЦ, у которой элементы имеют примерно одинаковые отражающие свойства (амплитуды эхо-сигналов E_i).

Переключение несущей частоты может осуществляться от такта к такту или от серии к серии замеров на этапе формирования параметров опорных точек.

Фильтрация (сглаживание) опорных точек угломестной фазы при сопровождении сложной цели. Если элементы СЦ не разрешаются по угловым координатам, то в каждом цикле сопровождения формируется, как правило, одна опорная точка, параметры которой характеризуют угломестное положение СЦ.

Обычное рекуррентное сглаживание опорных точек здесь не эффективно ввиду неоднозначности фазовых измерений. Поэтому для оценки параметров угломестной траектории целесообразно использовать корреляционный метод.

Траектория угломестной фазы $\phi_{(t)}$ с достаточной степенью точности может быть представлена в виде линейной функции с параметрами ϕ_0 и $\dot{\phi}$

$$\phi_{(t)} = \phi_0 + \dot{\phi}(t - t_0), \qquad (12)$$

где t_0 – время привязки (как правило, соответствующие середине интервала сопровождения); $\phi_0, \dot{\phi}$ – соответственно значения угломестной фазы и её производной.

На интервале сопровождения СЦ осуществляется накопление N опорных точек (замеров) угломестной фазы ϕ_i, определяемых в соответствии с (9).

Полученная функция фазы ϕ_i далее сравнивается с набором из M опорных (эталонных) функций фазы ϕ_{onij}. Сравнение осуществляется путем вычисления M значений корреляционного интеграла

$$\psi_j = \frac{1}{N}\sqrt{\left[\sum_{i=1}^{N} B_i \sin(\phi_i - \phi_{onij})\right]^2 + \left[\sum_{i=1}^{N} B_i \cos(\phi_i - \phi_{onij})\right]^2}, \qquad (13)$$

где B_i – нормированные весовые коэффициенты, обеспечивающие уменьшение уровня боковых лепестков.

Значения опорных функций фазы изменяются по линейному закону, а сами опорные функции отличаются углом наклона (параметром ϕ_{onij})

$$\phi_{onij} = \dot{\phi}_{onj}(t_i - t_0),$$

где $\phi_{onj} = \pm j\,\delta\dot{\phi}$; $j = 1,2\ldots\frac{M}{2}$; $t_0 = 0{,}5(t_N - t_1)$; t_1, t_0, t_N – моменты времени, соответствующие началу, середине и концу интервала наблюдения (сопровождения цели).

Значение дискретности отчёта производной фазы $\delta\dot{\phi}$ выбирается исходя из точности получаемых оценок, которая определяется временем наблюдения (сопровождения) цели τ_c.

$$\delta\dot{\phi} = \frac{\pi}{8\tau_c},$$

где $\tau_c = t_N - t_1$.

Диапазон анализа: $-\frac{2\pi}{\tau_c} \leq \Delta\dot{\phi} \leq \frac{2\pi}{\tau_c}$.

За оценку производной фазы $\hat{\dot{\phi}}$ траектории угломестной фазы (12) принимается параметр той (К-й) опорной функции, при сравнении с которой получено максимальное значение корреляционного интеграла (13):

$$\psi_{max} = \psi_{к} = \max\{\psi_j\}, \text{ т.е. } \hat{\dot{\phi}} = \phi_{onk}. \quad (14)$$

Если выполняется условие превышения значением $\psi_к$ некоторого порога $\psi_к \geq \psi_{пор}$, полученная оценка считается достоверной.

Значение оценки начальной фазы $\hat{\phi}_0$ в (12) формируется как постоянная составляющая измеренной функции угломестной фазы ϕ_i относительно опорной функции фазы с параметром $\dot{\phi}_к = \hat{\dot{\phi}}$

$$\hat{\phi}_0 = \operatorname{arctg} \sum_{i=1}^{N} \sin(\phi_i - \phi_{onik}) \Big/ \sum_{i=1}^{N} \cos(\phi_i - \phi_{onik}), \quad (15)$$

где $\phi_{onik} = к \cdot \delta\dot{\phi}(t_i - t_0)$.

Далее оценки параметров полученной функции угломестной фазы $\hat{\phi}_0$ и $\hat{\dot{\phi}}$ пересчитываются в значения параметров угломестной траектории ε_0 и $\dot{\varepsilon}$ в соответствии с (6), в результате получим

$$\varepsilon_{(t)} = \varepsilon_0 + \dot{\varepsilon}(t - t_0).$$

За счет сглаживания повышается точность оценки параметров угломестной траектории, в том числе компенсируются ошибки пеленга, вызванные угловыми шумами СЦ. Накопление и сглаживание N опорных точек позволяет уменьшить значения дисперсии оценок параметров угломестной траектории в N раз по сравнению с точностью единичных измерений. Если элементы СЦ разрешаются по какой-либо координате, то в очередном цикле сопровождения формируется несколько опорных точек, которые могут попасть в строб сопровождения (отождествления). При этом возможно перепутывание траекторий элементов СЦ, что приводит к значительным ошибкам в оценке их параметров.

В связи с этим целесообразным является сопровождение всей группы элементов СЦ при замене на траекторию центра группы [4]. В первую очередь это относится к сложным баллистическим целям (СБЦ).

Переменные состояния центральной траектории характеризуют среднее кинематическое поведения группы. Центральная траектория формируется и рекуррентно обновляется с помощью обычного Калмановского фильтра, который обрабатывает усредненные параметры m опорных точек x_i, попавших в строб отождествления. Строб отождествления формируется вокруг экстраполированного значения $x_{nэ}$:

$$\hat{x}_n = x_{nэ} + к_n(\bar{x}_n - x_{nэ}),$$

где $\hat{x}_n$ – оценка параметра траектории на момент времени t_n; $\bar{x}_n$ – измеренное и усредненное значение параметра; $к_n$ – коэффициент усиления фильтра;

$$\bar{x}_n = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m} x_{in}.$$

Переход на единую опорную траекторию (ЕОТ) может быть осуществлен в ходе сопровождения целей, если будет сформирован признак наличия сложной (групповой) цели. Для этого на момент привязки ЕОТ t_n усредняются параметры m траекторий элементов СЦ:

$$\hat{x}_n = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m} x_{nэ э}; \quad \hat{\dot{x}}_n = \frac{1}{m}\sum_{j=1}^{m} x_{nэ э},$$

где $\hat{\dot{x}}_n, \hat{x}_n$ – оценки параметров ЕОТ; $\dot{x}_{nэ э}, x_{nэ э}$ – экстраполированные значения параметров траектории j-го элемента СЦ.

Соответственно усредняются значения элементов корреляционной матрицы ошибок.

После этого уточняется состав СЦ, к которой относят элементы, параметры которых удовлетворяют соотношениям:

$$\Delta x_n \leq x_{nэ э} - \hat{x}_n; \quad \Delta\dot{x}_n \leq \dot{x}_{nэ э} - \hat{\dot{x}}_n.$$

В процессе сопровождения ЕОТ проверяется наличие отклонения отдельных элементов СЦ от группы, например, при их манёвре. Сопровождение отделяющихся целей может осуществляться с помощью ветвящихся алгоритмов, которые начинают функционировать при удалении цели на определённое расстояние от группы.

Выводы

Таким образом, изменение несущей частоты зондирующих сигналов с последующим усреднением замеров позволяет повысить точность формирования параметров опорных точек угломестной фазы для СЦ. Фильтрация опорных точек и переход на сопровождение единой опорной траектории также обеспечивает получение более точной информации о характере движения сложной цели.

Список литературы

1. *Островитянов Р.В., Басалов Ф.А. Статистическая теория радиолокации протяженных целей. – М.: Радио и связь, 1982. – 232 с.*
2. *Петерс, Веймер. Радиолокационное сопровождение сложных целей // Зарубежная радиоэлектроника. – 1991. – № 7. – С. 17-43.*
3. *Леонов А.И., Фомичев К.И. Моноимпульсная радиолокация. – М.: Радио и связь, 1984. – 312 с.*
4. *Форина А., Студер Ф. Цифровая обработка радиолокационной информации. Сопровождение целей. Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1993. – 340 с.*

Поступила в редакцию 1.08.2006

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.И. Замятин, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.