

УДК 621.396.9

И.В. Барышев, А.Л. Кравец, Л.Г. Кравец, С.Л. Кравец

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков

## СМЕЩЕНИЕ И ИСКАЖЕНИЕ ОТМЕТОК ОТ ДВИЖУЩИХСЯ ЦЕЛЕЙ НА ВЫХОДЕ ОПТИМАЛЬНОГО ФИЛЬТРА РСА

Исследована зависимость смещения отметки от движущейся цели на выходе оптимального фильтра РСА, а также изменения ее ширины и яркости от скорости движения цели. Показано также, что при угловой модуляции отраженного сигнала, например, за счет периодического движения перемещающихся деталей цели (колеса автомобиля, гусеницы и колеса танка), появляется несколько смещенных по азимуту ложных целей. Выведены выражения для определения величины смещения, ширины и яркости ложных целей, что позволит разработать методы компенсации (устранения) отметок от ложных целей.

**Ключевые слова:** фазовый спектр, оптимальный фильтр, девиация, фазочастотная характеристика.

### Введение

**Постановка проблемы.** Известно, что при разведке с помощью бортовых РЛС бокового обзора с синтезированной апертурой (РСА) наземных целей на индикаторе наблюдается смещение по азимуту движущихся целей (например, танковая колонна движется не по дороге, а в стороне от нее).

**Анализ публикаций.** Для устранения этого недостатка в американской РЛС «Грей Вулф» [1] применяют так называемое инверсное накопление, при котором компенсируют доплеровский сдвиг частоты в отраженных от цели импульсах, возникающий за счет движения цели. В отечественных бортовых РСА такое инверсное накопление отсутствует. В то же время в зависимости от направления движения целей доплеровский сдвиг частоты отраженных сигналов может быть одного порядка с максимальным доплеровским сдвигом частоты за счет движения РСА относительно цели или даже превышать его (например, при движении целей перпендикулярно траектории полета самолета-носителя РСА), и, если его не учитывать, то это может привести к существенным ошибкам в определении координат цели. Например, современная РЛС АН/АРУ-3 «Джистарс» [1] имеет антенну с шириной диаграммы направленности по азимуту  $\alpha=0,8$  град. Самолет-носитель Е-8А (созданный на базе «Боинг-707») летает со скоростью  $V_n = 800 \dots 900$  км/ч (222...250 м/с). Тогда максимальная радиальная скорость  $V_r$  по отношению к цели за время накопления (синтезирования апертуры) составит:

$$V_r = V_n \cdot (\sin 2 \text{ град}) = 250 \cdot 0,007 = 1,75 \text{ м/с (6,3 км/ч)},$$

что соответствует максимальному доплеровскому сдвигу частоты

$$F_{\text{дmax}} = \frac{2V_r}{c} \cdot f_0 = \frac{2 \cdot 1,75}{3 \cdot 10^8} \cdot 10^{10} = 117 \text{ Гц.}$$

(Некоторые РСА, дальность действия которых меньше, чем «Джистарс», имеют физическую ДНА

по азимуту порядка 3 град. При той же скорости полета самолета-носителя максимальный доплеровский сдвиг частоты составит 400...450 Гц).

В то же время максимальный доплеровский сдвиг частоты за счет движения цели, если цель движется параллельно траектории полета самолета-носителя РСА, будет на порядок меньше этого значения, но при движении перпендикулярно траектории полета самолета (при движении в направлении линии соприкосновения войск) может в 10 и более раз превышать его. Таким образом, будем считать, что значения доплеровского сдвига частоты за счет движения целей могут находиться в диапазоне  $(0,1 \dots 10) \cdot F_{\text{дmax}}$  и для РЛС типа «Джистарс» это составит 12...1170 Гц.

**Целью статьи** является получение выражений для определения величины смещения, ширины и яркости ложных целей, что позволит разработать методы компенсации (устранения) отметок от ложных целей.

### Изложение основного материала

Рассмотрим влияние этого доплеровского сдвига частоты на смещение отметки от цели на выходе оптимального фильтра РСА относительно действительных ее координат по азимуту, а также на изменение ее ширины и яркости (амплитуд смещенных откликов). При боковом обзоре местности при прямолинейном полете самолета-носителя РЛС отраженный от точечной цели сигнал, вследствие изменения радиальной составляющей скорости, приобретает доплеровский сдвиг частоты

$$F_d(t) = -\frac{2V_r(t)}{\lambda} = -\frac{2V \cdot \sin \alpha(t)}{\lambda} \approx -\frac{2V \cdot \alpha(t)}{\lambda} \approx -\frac{2V^2 \cdot t}{\lambda R}, \quad (1)$$

где  $\alpha$  – угол, отсчитываемый от направления максимума ДНА РЛС до рассматриваемого направления.

Разность фаз опорного и отраженного сигналов на выходе оптимального фильтра приемника РЛС

$$\varphi_d(t) = 2\pi \int F_d(t) \cdot dt = \frac{2\pi \cdot V^2}{\lambda \cdot R} \cdot t^2 = \frac{\Omega_{\text{дmax}}}{2\tau} \cdot t^2 = \frac{bt^2}{2}, \quad (2)$$

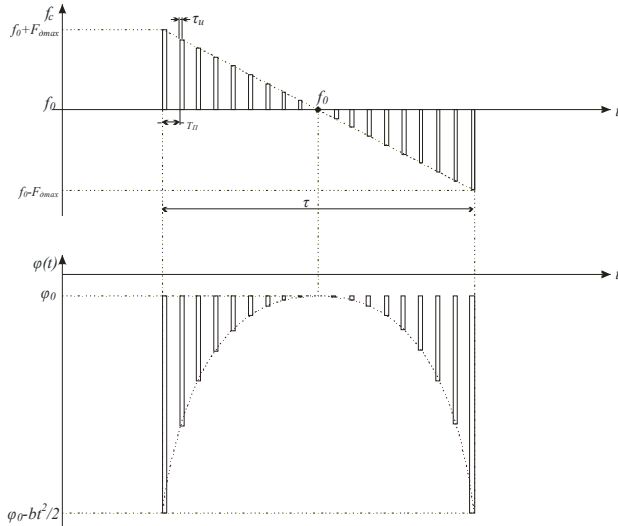


Рис. 1. Изменение частоты и фазы отраженных сигналов на входе РСА

где  $b = \Omega_{дmax} / \tau$  – скорость изменения частоты заполнения импульсов от импульса к импульсу в пачке длительностью  $\tau$ ;  $\tau$  – время облучения (время синтеза искусственной апертуры);  $\theta$  – ширина физической ДНА РЛС.

Принимаемый отраженный сигнал может быть представлен в виде

$$\dot{u}_c(t) = U_c(t \pm nT) \cdot e^{j(\omega_0(t \pm nT) + b(t \pm nT)^2/2 + \varphi_0)}. \quad (3)$$

Для упрощения расчетов примем период повторения импульсов  $T \rightarrow 0$ , что не повлияет на конечный результат. Тогда принимаемый отраженный сигнал можно представить в виде:

$$\dot{u}_c(t) = U_c(t) \cdot e^{j(\omega_0 t + bt^2/2 + \varphi_0)}, \quad (4)$$

где  $\omega_0$  – частота излучаемого сигнала;  $\varphi_0$  – начальная фаза;

$$U_c(t) = U_c \cdot G(t),$$

где  $G(t)$  – коэффициент усиления антенны.

При аппроксимации ДН колокольной кривой

$$G(t) = G_0 \cdot e^{-0,694 \left[ \frac{2\alpha(t)}{\theta} \right]^2} = G_0 \cdot e^{-0,694 \frac{4V^2}{R^2 \cdot \theta^2} \cdot t^2}; \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_c(t) &= U_c \cdot G_0 \cdot e^{-0,694 [2V/(R\theta)]^2 \cdot t^2} = \\ &= U_{cmax} \cdot e^{-0,694 [2V/(R\theta)]^2 \cdot t^2} = U_{cmax} \cdot e^{-\alpha \cdot t^2}; \end{aligned} \quad (6)$$

$\dot{U}_c(t) = U_c(t) \cdot e^{j(bt^2/2 + \varphi_0)}$  – комплексная амплитуда сигнала.

Фазовый спектр отраженного сигнала на входе оптимального фильтра имеет вид [2]:

$$\varphi(\omega) = \Psi_0 - \frac{(\omega - \omega_0)^2}{4\Omega_{дmax}} \tau \quad \text{при } (\omega - \omega_0) < \Omega_{дmax}, \quad (7)$$

где  $\Psi_0$  – постоянный фазовый сдвиг.

В соответствии с этим фазочастотная характеристика (ФЧХ) оптимального фильтра может быть записана следующим образом:

$$\Psi(\omega) = -\omega \cdot t + \frac{(\omega - \omega_0)^2}{4\Omega_{дmax}} \tau - \Psi_0. \quad (8)$$

Из (8) видно, что спектральные составляющие сигнала в зависимости от частоты задерживаются в оптимальном фильтре на разное время:

$$t_3 = -\frac{d\varphi(\omega)}{d\omega} = t_0 - \frac{(\omega - \omega_0)}{2\Omega_{дmax}} \cdot \tau, \quad (9)$$

являющееся линейно убывающей функцией частоты.

Пусть отраженный сигнал за счет движения цели приобретает дополнительный сдвиг по частоте  $\pm \Delta\omega$ . Тогда фазовый спектр сигнала на входе РЛС

$$\varphi(\omega) = -\frac{[(\omega \pm \Delta\omega) - \omega_0]^2}{4\Omega_{дmax}} \cdot \tau + \Psi_0. \quad (10)$$

При прохождении сигнала через фильтр его фазовый спектр суммируется с ФЧХ фильтра:

$$\varphi(\omega) + \Psi(\omega) = -\frac{[(\omega \pm \Delta\omega) - \omega_0]^2}{4\Omega_{дmax}} \cdot \tau + \Psi_0 - \omega \cdot t_0 + \quad (11)$$

$$\frac{(\omega - \omega_0)^2}{4\Omega_{дmax}} \cdot \tau - \Psi_0 = -\omega \cdot t_0 - \frac{\Delta\omega^2 \pm (\omega - \omega_0) \cdot \Delta\omega}{4\Omega_{дmax}} \cdot \tau.$$

Задержка

$$t_3 = -\frac{d[\varphi(\omega) + \Psi(\omega)]}{d\omega} = t_0 \pm \frac{\Delta\omega}{2\Omega_{дmax}} \cdot \tau. \quad (12)$$

Следовательно, при переотражении сигналов РЛС от цели с дополнительным сдвигом по частоте на выходе оптимального фильтра сигнал появляется со сдвигом во времени относительно сигнала, соответствующего истинному положению цели, на величину

$$\pm \Delta t_3 = \mp \frac{\Delta f}{2F_{дmax}} \cdot \tau = \mp v \tau, \quad (13)$$

где  $v = \Delta f / (2F_{дmax})$  – относительная расстройка по частоте.

Таким образом, при сдвиге частоты на  $\Delta f$  будет имитироваться ложное изображение, отстоящее по азимуту от истинного положения цели на величину

$$\pm \Delta L = \mp V_{пл} \cdot \Delta t_3 = \mp V_{пл} \cdot \frac{\Delta f}{2F_{дmax}} \cdot \tau \quad (14)$$

(например, для РЛС «Джистарс» ( $V_n = 250$  м/с;  $F_{дmax} = 117$  Гц;  $R_{рлс-ц} = 200$  км;  $\tau = 5$  с) при  $\Delta f = 50$  Гц ( $V_{цр} = 2,7$  км/ч) получим  $\Delta L = 267$  м; на дальности  $R_{рлс-ц} = 100$  км  $\Delta L = 133,5$  м).

Поскольку система «Джистарс» выдает целеуказание не только авиации и пунктам управления оперативно-тактических ракет «Джитакмс», но и полевой артиллерии, такая точность целеуказания для полевой артиллерии является недостаточной.

Как видно из примера, величина смещения отметки от цели зависит от дальности РЛС-цель, поскольку величина  $\tau$  является линейной функцией этой дальности

$$\tau = \frac{F_{дmax} \cdot \lambda}{V^2} \cdot R, \quad (15)$$

т.е. при постоянном смещении частоты в отраженном сигнале ложные цели на разных дальностях после их оптимальной фильтрации будут смещены по азимуту (во времени) относительно истинного положения целей пропорционально их дальностям до РЛС.

Когда  $\Delta t_3$  одного порядка с  $\tau$  (т.е. когда  $\Delta f$  одного порядка с  $F_{д\max}$ ), временной сдвиг фазовой функции приводит к изменению формы сигнала на выходе фильтра: уменьшению его амплитуды и увеличению длительности.

То же самое будет наблюдаться при линейной фазовой модуляции сигнала при отражении от цели.

При этом, если доплеровский сдвиг частоты отраженного от цели сигнала за счет движения цели относительно РЛС превышает максимальное значение доплеровского сдвига частоты за счет движения самолета-носителя РЛС, то это не приведет к смещению отметки от цели (предполагается, что спектр отраженного сигнала при этом попадает в полосу пропускания приемника РЛС).

Рассмотрим теперь случай, когда при отражении сигнала от цели осуществляется частотная или фазовая модуляция отраженного сигнала.

Пусть смещение фазы в отраженном сигнале происходит по гармоническому закону:

$$\Delta\varphi(t) = \theta_{\max} \cdot \text{Sin}\Omega_m t, \quad (16)$$

где  $\theta_{\max}$  – индекс фазовой модуляции;  $\Omega_m = 2\pi \cdot F_m$  – модулирующая частота, или, что то же самое, смещение частоты изменяется по закону:

$$\Delta\omega(t) = \Delta\omega_d \cdot \text{Cos}\Omega_m t, \quad (17)$$

где  $\Delta\omega_d$  – девиация частоты. Тогда фазовая функция сигнала на входе фильтра:

$$\begin{aligned} \varphi(t) &= \int [\omega(t) + \Delta\omega(t)] \cdot dt = \\ &= bt^2 + \frac{\Delta\omega_d}{\Omega_m} \text{Sin}\Omega_m t = bt^2 + \theta_{\max} \text{Sin}\Omega_m t. \end{aligned} \quad (18)$$

Комплексная амплитуда сигнала на входе оптимального фильтра

$$\dot{U}_{\text{вх}}(t) = U(t) \cdot e^{j(bt^2 + \theta_{\max} \text{Sin}\Omega_m t)}. \quad (19)$$

Разлагая это выражение в ряд Фурье и производя необходимые преобразования, получим:

$$\begin{aligned} \frac{\dot{U}_{\text{вх}}(t)}{U(t)} &= J_0(\theta_{\max}) \cdot e^{jbt^2} + \sum_{k=1}^n J_k(\theta_{\max}) \cdot e^{j(bt^2 + k\Omega_m t)} + \\ &+ \sum_{k=1}^n (-1)^k \cdot J_k(\theta_{\max}) \cdot e^{j(bt^2 - k\Omega_m t)}, \end{aligned} \quad (20)$$

где  $J_k(\theta_{\max})$  – функция Бесселя первого рода  $k$ -го порядка от аргумента  $\theta_{\max}$

Таким образом, сигнал на входе оптимального фильтра в этом случае может быть представлен в виде неискаженного колебания с амплитудой  $J_0(\theta_{\max})$  и с фазовой функцией  $bt^2$  и суммы парных побочных колебаний с амплитудами  $J_k(\theta_{\max})$ , фазовые функции которых имеют, кроме члена  $bt^2$ , дополнительные линейные члены с крутизной

$\pm k\Omega_m$ , создающие временные сдвиги фазовых функций побочных колебаний на

$$\pm k\delta t = \pm k \frac{\Omega_m}{2\omega_{д\max}} \cdot \tau. \quad (21)$$

Это приводит к появлению на выходе оптимального фильтра ложных сигналов, сдвинутых во времени относительно сигнала, соответствующего истинному положению станции помех, на величины  $\pm k\delta t$ .

Чтобы сигналы от соседних точечных целей не накладывались друг на друга (после оптимальной обработки), необходимо выполнить условие:

$$\delta t = (F_m / (2F_{д\max})) \cdot \tau > \tau_{\text{вых}} = 1/F_{д\max}, \quad (22)$$

$$\text{откуда} \quad F_m > 2/\tau. \quad (23)$$

$$\text{Обозначим} \quad \Omega_m / (2\omega_{д\max}) = v. \quad (24)$$

Тогда в соответствии с (22) ширина ложных сигналов на выходе оптимального фильтра может быть определена по формуле:

$$\tau_{\text{вых}0,7} \approx 1 / (2F_{д\max} \cdot (1 - kv_m)). \quad (25)$$

Следовательно, чем больше номер  $k$  ложного изображения, тем оно шире по азимуту. В то же время интенсивность ложных сигналов будет уменьшаться с увеличением  $k$ :

$$u^2(\Delta t) \sim \frac{\omega_{д\max} \cdot \tau}{2} (1 - kv_m)^2 = \frac{k_{\text{сж}}}{4} (1 - kv_m)^2. \quad (26)$$

## Выводы

1. Исследованы зависимости смещения отметки от движущейся цели на выходе оптимального фильтра РСА, а также изменения ее ширины и яркости от скорости движения цели.

2. Показано, что при угловой модуляции отраженного сигнала, например, за счет периодического движения перемещающихся деталей цели (колеса автомобиля, гусеницы и колеса танка), появляется несколько смещенных по азимуту ложных целей. Получены выражения для определения величины смещения, ширины и яркости ложных целей.

3. Полученные в работе зависимости позволяют разработать методы компенсации смещения отметки от движущейся цели, а также устранения отметок от ложных целей, появляющихся вследствие угловой модуляции отраженного сигнала, вызванной периодическим движением перемещающихся деталей цели.

## Список литературы

1. Афинов В. Американские самолеты Е-8С «Джистарс» и S-3Е «Грей Вулф» // *Зарубежное военное обозрение*. – 1997. – №2.

2. *Защита радиолокационных систем от помех. Состояние и тенденции развития / Под ред. А.И. Канащенкова и В.И. Меркулова*. – М.: Радиотехника, 2003. – 416 с.

Поступила в редколлегию 10.07.2008

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. В.К. Волосюк, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", Харьков.

### ЗСУВ І ПЕРЕКРУЧУВАННЯ ПОЗНАЧОК ВІД РУХОМИХ ЦІЛЕЙ НА ВИХОДІ ОПТИМАЛЬНОГО ФІЛЬТРА РСА

І.В. Баришев, А.Л. Кравець, Л.Г. Кравець, С.Л. Кравець

*Досліджено залежність зсуву відмітки від рухомої цілі на виході оптимального фільтра РСА, а також зміни її ширини і яскравості від швидкості руху цілі. Показано також, що при кутовій модуляції відбитого сигналу, наприклад, за рахунок періодичного руху деталей цілі, що переміщуються (колеса автомобіля, гусениці й колеса танка), з'являється декілька зміщених по азимуті помилкових цілей. Виведено вираження для визначення величини зсуву, ширини і яскравості помилкових цілей, що дозволить розробити методи компенсації (усунення) оцінок від помилкових цілей.*

**Ключові слова:** фазовий спектр, оптимальний фільтр, девіація, фазочастотна характеристика.

### SHIFT AND DISTORTION OF THE MARKS FROM THE MOVING TARGETS ON THE EXIT OF THE OPTIMAL RSA FILTER

I.V. Baryshev, A.L. Kravec, L.G. Kravec, S.L. Kravec

*The dependence of the mark shift from the moving target on the exit of the optimal RSA filter was researched and also the change of its width and brightness dependent on target's speed. It is also shown that during angle modulation of the reflected signal, for example due to periodical movement of shifting target details (wheels of an automobile, crawlers and wheels of a tank), few azimuth shifted false targets appear. Expressions were deduced for determination of the size of the shift, the width and the brightness of the false targets which will allow to develop mark compensation (elimination) methods from false targets.*

**Keywords:** phase filter, optimal filter, deviation, phase-frequency characteristic.