
УДК 621.391.26

В.Д. Карлов¹, А.Н. Чёрный², Д.В. Карлов¹, О.В. Бесова¹

¹Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков

²Научно-исследовательский центр (государственный океанариум)
Вооруженных Сил Украины, Севастополь

О ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ЗАПАЗДЫВАНИЯ ПОЛЕЗНОГО СИГНАЛА НА ФОНЕ МЕШАЮЩЕГО

В статье получена формула, позволяющая оценить точность измерения запаздывания полезного сигнала на фоне мешающего приёмным устройством, предназначенным для измерения запаздывания сигнала, отражённого от одиночной цели. Показано, что наличие мешающего сигнала наряду с увеличением дисперсии измерения запаздывания полезного сигнала приводит к тому, что оценка запаздывания полезного сигнала становится смещённой. Получено соотношение, позволяющее оценить величину этого смещения.

Ключевые слова: полезный сигнал, мешающий сигнал, дисперсия, запаздывание сигнала, согласованный фильтр.

Введение

Постановка проблемы. При локации целей зачастую возникают случаи, когда в одном импульсном объеме присутствуют несколько целей. Это обусловлено, с одной стороны, тактикой приме-

нения летательных аппаратов [1], а с другой – использованием в радиолокаторах сигналов различной длительности [2]. Это приводит к тому, что при измерении дальности до цели мы имеем дело с полезным и мешающим сигналами. Традиционно [2] в радиолокации в таком случае измерения дальности

до цели производят с помощью измерителя, в состав которого входит фильтр, согласованный с зондирующим сигналом. Измерение дальности при локации одиночных целей таким устройством, а также реализуемая при этом точность подробно рассмотрены в литературе [2, 3]. Однако случай наличия помехового сигнала, обусловленного отражением от другой цели, и достижимые при этом точности измерения запаздывания сигнала, отраженного от лоцируемой цели (полезный сигнал), не нашёл должного освещения в известной литературе.

Цель статьи: получить соотношения, позволяющие оценить точность измерения полезного сигнала на фоне мешающего приёмным устройством, предназначенным для измерения запаздывания сигнала отраженного от одиночной цели.

Основная часть

Измерения запаздывания сигнала, отраженного от точечной цели, обычно осуществляют с помощью приемного устройства, схема которого изображена на рис. 1 [2, 3]. Устройство содержит антенну, согласованный фильтр, квадратичный детектор и блок оценки запаздывания (τ_1 при этом проводят по положению на оси времени максимума выходного напряжения $u(t)$ квадратичного детектора.

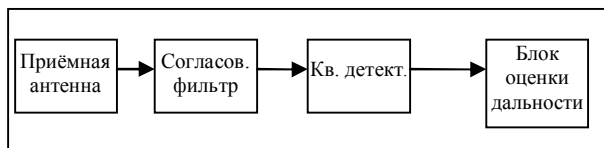


Рис. 1. Схема устройства для измерения запаздывания сигнала, отраженного от одиночной точечной цели

Рассмотрим, как влияет мешающий сигнал на точность оценки запаздывания полезного сигнала по максимуму выходного эффекта приемника. Расчеты проведем по методике, изложенной в [4].

Дисперсия измерения запаздывания τ_1 по максимуму выходного напряжения $u(t)$ определяется следующей формулой [4]:

$$\sigma^2\{\tau_1\} = \left\{ \frac{d}{dt} [u(t) - \overline{u(t)}] \right\}^2 \cdot \left\{ \frac{d^2}{dt^2} \overline{u(t)} \right\}^{-2} \Bigg|_{t=\tau_1}, \quad (1)$$

где черта сверху - знак математического ожидания.

Наличие мешающего сигнала вызывает увеличение $\sigma^2\{\tau_1\}$. Кроме того, из-за мешающего сигнала оценка запаздывания τ_1 становится смещенной. Величину этого смещения можно определить по формуле [4]:

$$\Delta = \left\{ \frac{d}{dt} [u(t) - \overline{u(t)}] \right\}^2 \cdot \left\{ \frac{d^2}{dt^2} \overline{u(t)} \right\}^{-2} \Bigg|_{t=\tau_1}. \quad (2)$$

Найдем напряжение на выходе детектора $u(t)$ в случае, когда цель состоит из двух элементов. Зондирующий импульс $y(t)$ представим в таком виде:

$$y(t) = \sqrt{2P_0} \dot{Z}(t) \exp\{i\omega_0 t\},$$

где P_0 – импульсная мощность передатчика; $\dot{Z}(t)$ – комплексная огибающая зондирующего импульса.

Рассмотрев отражение импульса от цели, применив метод огибающих [2] для анализа процесса фильтрации отраженного сигнала в приемнике, находим напряжение $x(t)$ на выходе согласованного фильтра:

$$\begin{aligned} x(t) = & \frac{1}{2} c_1 T_{\text{эф}} \cdot K_1 \frac{\sqrt{\sigma_1}}{R_1^2} |\psi(t-t_0-t_1, \Omega_1)| \\ & \cos[\omega_0(t-t_0-\tau_1) + \varphi_1 + \Omega_1 \tau_1] + \\ & + \frac{1}{2} c_1 T_{\text{эф}} \cdot K_2 \frac{\sqrt{\sigma_2}}{R_2^2} |\psi(t-t_0-t_2, \Omega_2)| \\ & \cos[\omega_0(t-t_0-\tau_2) + \varphi_2 + \Omega_2 \tau_2], \end{aligned} \quad (3)$$

где $\psi(\tau, \Omega) = \frac{1}{T_{\text{эф}}} \int_{-\infty}^{\infty} \dot{z}(t) \dot{z}^*(t-\tau) e^{j\Omega t} dt$;

$$T_{\text{эф}} = \int_{-\infty}^{\infty} \dot{z}(t) \dot{z}^*(t) dt$$

t_0, c_1 – постоянные (определяются параметрами фильтра);

$\sigma_{1,2}$ – эффективная отражающая поверхность первого (полезного) и второго (мешающего) элементов цели соответственно;

$R_{1,2}$ – дальность до первого и второго элементов цели соответственно

$\tau_{1,2}$ – запаздывание полезного и мешающего сигналов соответственно;

$\Omega_{1,2}$ – доплеровское смещение частоты полезного и мешающего сигналов;

$\varphi_{1,2}$ – набег фазы, возникающий при отражении зондирующего импульса от цели (от первого и второго элементов цели, соответственно);

$\psi(\tau, \Omega)$ – автокорреляционная функция модуляции зондирующего импульса;

$T_{\text{эф}}$ – эффективная длительность зондирующего импульса

$$K_{1,2} = \sqrt{\frac{2P_0 G_n G_{\text{нр}} \lambda^2}{(4\pi)^3}} g_n(\varphi_{1,2}, \theta_{1,2}) g_{\text{нр}}(\varphi_{1,2}, \theta_{1,2});$$

$G_n G_{\text{нр}}$ – коэффициент усиления передающей и приемной антенн соответственно, λ – длина волны;

$g_n(\varphi, \theta)$, $g_{\text{нр}}(\varphi, \theta)$ – нормированная характеристика направленности соответственно передающей и приемной антенн;

$\varphi_{1,2}, \theta_{1,2}$ – угловые координаты первого и второго элементов цели соответственно.

Найдем математическое ожидание $u(t)$ в функцию корреляции $R(t_1, t_2)$ центрированного случай-

ного процесса $u(t) - \overline{u(t)}$. Очевидно, что $u(t) = \overline{x^2(t) + n^2(t)}$, где $\overline{n^2(t)}$ – дисперсия шума на выходе согласованного фильтра ($\overline{n^2(t)} = 0, 5c_1^2 N_{ш} T_{эф}$, $N_{ш}$ – спектральная плотность шума). С учетом фильтрации сигнала $x^2(t)$ в нагрузке детектора получаем, что

$$u(t) = \left(\frac{1}{2} C_1 T_{эф} \right)^2 \left\{ \frac{\sigma_1 k_1^2}{2R_1^4} |\psi(t - t_0 - \tau_1, \Omega_1)|^2 + \frac{\sigma_2 k_2^2}{2R_2^4} |\psi(t - t_0 - \tau_2, \Omega_2)|^2 + \frac{\sqrt{\sigma_1 \sigma_2} k_1 k_2}{2R_1^2 R_2^2} \times |\psi(t - t_0 - \tau_1, \Omega_1)| \cdot |\psi(t - t_0 - \tau_2, \Omega_2)| \cos \Delta \Psi \right\} + \left(C_1^2 N_{ш} / 2 \right) \cdot T_{эф}, \quad (4)$$

где $\Delta \Psi = \omega_0(\tau_1 - \tau_2) + \varphi_2 - \varphi_1 + \Omega_1 \tau_1 - \Omega_2 \tau_2$.

Следуя [5], находим, что автокорреляционная функция $R(t_1, t_2)$ процесса $u(t) - \overline{u(t)}$ определяется выражением:

$$R(t_1, t_2) = 2R_n^2(t_1, t_2) + 4R_n^2(t_1, t_2) \cdot R_x(t_1, t_2),$$

где $R_n(t_1, t_2)$ – автокорреляционная функция шума, прошедшего через согласованный фильтр,

$$R_n(t_1, t_2) = \frac{C_1^2 T_{эф}^2}{2} N_{ш} |\psi(t_2 - t_1, 0)| \cos \omega_0(t_2 - t_1)$$

$$R_x(t_1, t_2) = \left(\frac{1}{2} C_1 \cdot T_{эф} \right)^2 \left\{ \frac{\sigma_1 k_1^2}{2R_1^4} |\psi(t_1 - t_0 - \tau_1, \Omega_1)| |\psi(t_2 - t_0 - \tau_1, \Omega_1)| \times \cos \omega(t_2 - t_1) + \frac{\sigma_2 k_2^2}{2R_2^4} |\psi(t_1 - t_0 - \tau_2, \Omega_2)| |\psi(t_2 - t_0 - \tau_2, \Omega_2)| \cos \omega(t_2 - t_1) + \frac{k_1 k_2 \sqrt{\sigma_1 \sigma_2}}{2R_1^2 R_2^2} \left[|\psi(t_1 - t_0 - \tau_1, \Omega_1)| \cdot |\psi(t_2 - t_0 - \tau_2, \Omega_2)| \cos[\omega_0(t_2 - t_1) + \Delta \Psi] + |\psi(t_2 - t_0 - \tau_1, \Omega_1)| \cos[\omega_0(t_2 - t_1) - \Delta \Psi] \right] \right\}.$$

Числитель формулы (1) – это дисперсия процесса $u(t) - \overline{u(t)}$, прошедшего через дифференцирующую цепь. Следовательно, для его нахождения необходимо дважды продифференцировать $R(t_1, t_2)$ и положить $t_1 - t_0 = t_2 - t_0 = \tau_1$. Эти расчеты были выполнены применительно к колокольному зондирующему импульсу для случая, когда скорости радиального движения целей являлись одинаковыми Ω_1, Ω_2 . В результате получена следующая формула для дисперсии $\sigma\{\tau_1\}$ измерения запаздывания полезного сигнала на фоне мешающего:

$$\sigma^2\{\tau_1\} =$$

$$1 + \frac{q_1^2}{4} + \frac{q_2^2}{4} e^{-z} + \frac{q_1 q_2}{2} e^{-\frac{z}{2}} \cos \Delta \Psi + \frac{q_2^2}{4} e^{-z} \cdot z \cdot \frac{8T_{эф}^2}{\pi q_1^4}, \quad (5)$$

$$1 + \frac{q_2}{q_1} e^{-z} (1 - 2z) + 2 \frac{q_2}{q_1} \cos \Delta \Psi e^{-\frac{z}{2}} \left(1 - \frac{z}{2} \right) \cdot \pi q_1^4,$$

где q_1 и q_2 – отношение сигнал/шум (по напряжению) для первого и второго элементов цели, соответственно,

$$z = \frac{\pi}{2} \left(\frac{\Delta \tau}{T_{эф}} \right)^2, \quad \Delta \tau = \tau_2 - \tau_1.$$

Если в (5) устремить $\Delta \tau$ к бесконечности, то получаем известную формулу для дисперсии измерения запаздывания сигнала отраженного от одиночной цели:

$$\sigma_\infty^2 = 2T_{эф}^2 \cdot (\pi q_1^2)^{-1}.$$

Подставив (4) в (2) и выполнив дифференцирование $\overline{u(t)}$ по t , получаем следующую формулу для систематической ошибки Δ :

$$\Delta = \Delta \tau \times$$

$$\times \frac{q_2^2 e^{-z} + q_1 q_2 e^{-\frac{z}{2}}}{q_1^2 + q_2^2 e^{-z} (1 - 2z) + 2q_1 q_2 e^{-\frac{z}{2}} \cos \Delta \Psi \left(1 - \frac{z}{2} \right)}, \quad (6)$$

Учитывая, что разность фаз $\Delta \Psi$ от зондирования к зондированию изменяется случайным образом, найдем среднее значение $\overline{\sigma^2\{\tau_1\}}$ и $\overline{\Delta}$. Полагая закон распределения разности фаз равномерным от 0 до 2π , получаем

$$\frac{\sqrt{\sigma^2(\tau_1) + (\overline{\Delta})^2}}{\sigma_\infty\{\tau_1\}} = \frac{\sqrt{a \cdot c - b \cdot d + f^2 c \cdot z \cdot q_1^4}}{\sqrt{(c^2 - d^2)^2 \left(1 + q_1^2 / 4 \right)}}, \quad (7)$$

где

$$a = 1 + \frac{q_1^2}{4} + m^2 q_1^2 \cdot \frac{e^{-z}}{4} (1 + z),$$

$$b = \frac{q_1^2 m}{2} e^{-\frac{z}{2}}, \quad c = 1 + m^2 e^{-z} (1 - 2z),$$

$$d = 2m \cdot e^{-\frac{z}{2}} \left(1 - \frac{z}{2} \right), \quad f = m \cdot e^{-z} (m + 1).$$

Результаты расчета отношения

$$\frac{\sqrt{\sigma^2(\tau_1) + (\overline{\Delta})^2}}{\sigma_\infty\{\tau_1\}} = \frac{\overline{\sigma_\Sigma}(\tau)}{\sigma_\infty(\tau)}$$

для $m = q_2/q_1$ ($m=0,1 \div 0,9$ с шагом 0,1) приведены на рис. 2, а, б.

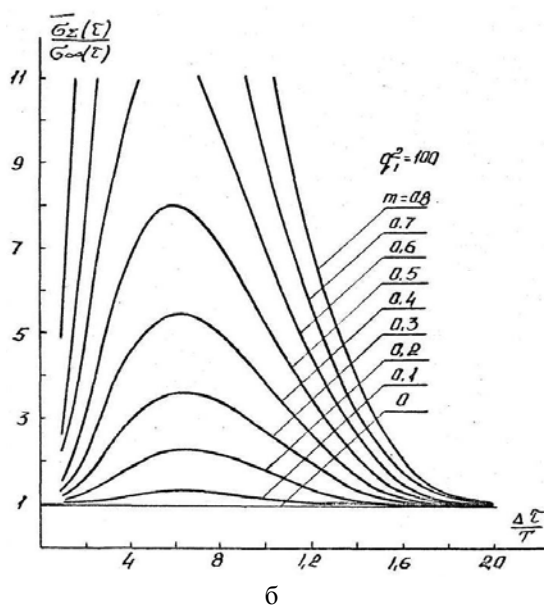
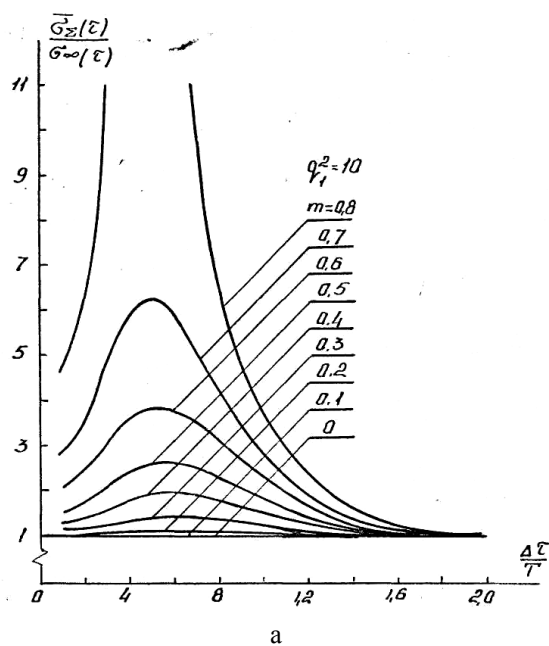


Рис. 2. Нормированная ошибка измерения запаздывания полезного сигнала на фоне мешающего (а – случай слабого полезного сигнала, б – случай сильного полезного сигнала)

Результаты расчетов нормированной ошибки измерения запаздывания полезного сигнала на фоне мешающего, приведенные на рис. 2, позволяют оценить влияние мешающего сигнала на точность измерения запаздывания полезного сигнала в зависимости от степени перекрытия сигналов ($\Delta t/T$) и амплитуды мешающего сигнала ($m = q_2/q_1$). Из приведенных графиков следует, что мешающий сигнал существенно ухудшает точность измерения запаздывания полезного сигнала. В частности, в случае, даже когда амплитуда мешающего сигнала равна половине амплитуды полезного сигнала, погрешность измерения запаздывания полезного сигнала увеличивается от 4 до 8 раз.

Выводы

При использовании приемного устройства, предназначенного для измерения запаздывания одиночной цели в качестве дальномера полезной цели, при наличии в импульсном объеме мешающих целей, для повышения точности измерений дальности до лоцируемой (полезной) цели нужно предусмотреть меры по подавлению отражений от мешающих целей.

Список литературы

1. Єрмошин М.О. Борьба в повітрі: Навч. посібник / М.О. Єрмошин, В.М. Федай. – Х.: ХВУ, 2004. – 384 с.
2. Радиоэлектронные системы: Справочник / Под ред. Я.Д. Ширмана. – М.: Радиотехника, 2007. – 510 с.
3. Теоретические основы радиолокации / Под ред. Я.Д. Ширмана. – М.: Сов. радио, 1970. – 560 с.
4. Фалькович С.Е. Прием радиолокационных сигналов на фоне флуктуационных помех / С.Е. Фалькович. – М.: Сов. радио, 1961. – 311 с.
5. Зеленский А.А. Обработка случайных сигналов и процессов / А.А. Зеленский, А.Н. Беседин., Г.П. Кулемин. В.В. Лукин. – Х.: ХАИ, 2005. – 468 с.

Поступила в редколлегию 4.06.2013

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Л.Ф. Купченко, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

ПРО ТОЧНІСТЬ ВИМІРУ ЗАПІЗНЮВАННЯ КОРИСНОГО СИГНАЛУ НА ФОНІ ТОГО, ЩО ЗАВАЖАЄ

В.Д. Карлов, А.М. Черний, Д.В. Карлов, О.В. Бесова

У статті отримана формула, що дозволяє оцінити точність виміру запізнювання корисного сигналу на тлі того, що заважає приймальним пристроєм, призначеним для виміру запізнювання сигналу, відбитого від поодинокі мети. Показано, що наявність сигналу, що заважає, разом зі збільшенням дисперсії виміру запізнювання корисного сигналу призводить до того, що оцінка запізнювання корисного сигналу стає зміщеною. Отримано співвідношення, що дозволяє оцінити величину цього зміщення.

Ключові слова: корисний сигнал, що заважає сигнал, дисперсія, запізнювання сигналу, погоджений фільтр.

ABOUT EXACTNESS OF MEASURING OF DELAY USEFUL SIGNAL ON BACKGROUND OF MIXING

V.D. Karlov, A.M. Cherny, D.V. Karlov, O.V. Besova

A formula, allowing to estimate exactness of measuring of delay of useful signal on a background mixing a takers-off, intended for measuring of delay of signal, reflected from a single aim, is got in the article. It is shown that the presence of mixing signal along with the increase of dispersion of measuring of delay of useful signal results in that the estimation of delay of useful signal becomes displaced. Correlation, allowing to estimate this relocation bias, is got.

Keywords: useful signal, mixing a signal, dispersion, delay of signal, concerted filter.