

УДК 621.396.96

В.Д. Карлов, И.Г. Леонов, А.Е. Присяжный, О.Я. Луковский

*Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба***ОБНАРУЖЕНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ЦЕЛЕЙ В УСЛОВИЯХ ШУМОВЫХ И ПАССИВНЫХ ПОМЕХ С ШИРОКИМ ДОПЛЕРОВСКИМ СПЕКТРОМ**

*На основе байесовского подхода синтезирован обнаружитель эхо-сигнала от целей, работающий в условиях шумовых и пассивных помех с широким доплеровским спектром.*

*аэродинамическая цель, доплеровский спектр*

**Введение**

**Постановка проблемы.** При загоризонтном обнаружении аэродинамических целей в условиях тропосферных волноводов возникают отражения от местных предметов, источники которых могут располагаться за радиогоризонтом. Это, прежде всего, горные гряды, противоположный берег моря, отражения от морской поверхности и т. д. Одновременно может существовать несколько тропосферных волноводов. Ситуация еще более усложняется при работе радиолокационных станций (РЛС) с многопестковой диаграммой направленности по углу места и обнаружении малоразмерных целей. Указанные причины приводят к расширению доплеровского спектра сигнала, отраженного от таких местных предметов. Ширина доплеровского спектра может достигать единиц килогерц [1, 5].

Поэтому выделение целей на фоне таких помех традиционными способами, основанными на частотной селекции, является затруднительным, а исключение интервалов дальности, соответствующих местным предметам, из процесса обработки в ряде случаев может быть недопустимым. Следовательно, разработка устройств, позволяющих производить обнаружение целей в данных условиях, является актуальной.

**Анализ литературы.** В известной литературе [1, 2] выделение аэродинамических целей в условиях пассивных помех сводится к селекции по доплеровской частоте или селекции по дальности. Вопросы обнаружения детерминированных сигналов в условиях широкого доплеровского спектра в постановочном плане освещены в [3], где рассмотрена многоальтернативная задача обнаружения с простой гипотезой. Существует возможность перехода к двухальтернативной задаче, что рассмотрено в данной статье.

**Цель статьи.** Целью данной статьи является рассмотрение возможности построения обнаружителя, способного обнаруживать эхо-сигналы от целей в условиях шумовых и пассивных помех с широким доплеровским спектром.

**Основная часть**

Одной из важных задач современной теории радиолокации является разработка устройств, работающих в условиях априорной неопределенности. Одним из направлений этой теории является синтез оптимальных и квазиоптимальных устройств обработки сигналов на фоне негауссовых помех. В этих условиях обработка сигнала линейными согласованными фильтрами или корреляторами не является оптимальной [3], а в некоторых случаях, например, когда помеха существенно превышает сигнал по мощности, такая схема обработки теряет работоспособность. Особенно трудно выделить сигнал на фоне помех, совпадающих по структуре с полезным сигналом, что характерно для сигналов, отраженных от местных предметов.

Согласно [2], обнаружение сигнала на фоне помехи сводится к вычислению отношения правдоподобия и сравнению его с порогом. В случае негауссового распределения помехи непосредственное вычисление отношения правдоподобия наталкивается на серьезные математические трудности. Задача может быть решена путем рассмотрением многоальтернативной ситуации на входе приемника.

Пусть обнаруживается сигнал на фоне аддитивной помехи в виде «белого» гауссового шума и пассивной помехи, состоящей из мешающих сигналов, совпадающих по структуре с полезным. Моменты появления мешающих сигналов на входе приемника можно считать пуассоновским случайным процес-

сом, характеризующимся параметром  $\lambda$ . Таким образом, помеха, действующая на сигнал на входе приемника, отлична от гауссовой. Дополнительно предположим, что

$$P_c \ll P_{\text{ш}}; \quad P_c \ll P_{\text{ш}}, \quad (1)$$

где  $P_c$ ,  $P_{\text{ш}}$  и  $P_{\text{шп}}$  – мощности сигнала, шума и пассивной помехи, что характерно для реальных РЛС приморского базирования при обнаружении мало-размерных целей.

Тогда, многоальтернативная ситуация может быть отображена в виде состояний  $S_0, S_1, S_2, S_3$  с априорными вероятностями появления  $P_0, P_1, P_2, P_3$ , и выносимыми решениями  $\Gamma_0, \Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3$ , где  $S_0$  соответствует наличию на входе приемника пассивной помехи и шума,  $S_1$  – сигнала и шума,  $S_2$  – пассивной помехи, сигнала и шума, а  $S_3$  – одного шума.

Проведем синтез устройства обработки по критерию минимума среднего риска. Такой подход возможен, т. к. при байесовском подходе структура приемника совпадает со структурой приемников, синтезированных по критериям идеального наблюдателя, Неймана-Пирсона и др.

Минимальное значение среднего риска реализуется при разбиении пространства выборок  $X$  на области  $X_k, k = 0, 1, 2, 3$ , определяемые системой неравенств [3]:

$$\sum_{i=1}^3 (\Pi_{ij} - \Pi_{ik}) \frac{P_i \omega(\bar{x}/S_i)}{P_0 \omega(\bar{x}/S_0)} \geq 0, \quad j = 1, 2, 3, \quad j \neq k, \quad (2)$$

$\Pi_{ij}$  – платы за решения. Обозначив

$$y_i = \frac{P_i \omega(\bar{x}/S_i)}{P_0 \omega(\bar{x}/S_0)} \quad i = 1, 2, 3,$$

получим

$$\sum_{i=1}^3 (\Pi_{ij} - \Pi_{ik}) y_i \geq \Pi_{0k} - \Pi_{0j}, \quad j = 1, 2, 3, \quad j \neq k, \quad (3)$$

где  $y_i$  – обобщенные отношения правдоподобия. Полагая платы за правильные решения равными нулю, а за ошибочные решения — равноценными, выражение (3) можно переписать в виде:

$$\begin{cases} y_1 \geq 1 \\ y_1 \geq y_2 \\ y_1 \geq y_3 \end{cases}, \quad \begin{cases} y_2 \geq 1 \\ y_2 \geq y_1 \\ y_2 \geq y_3 \end{cases}, \quad \begin{cases} y_3 \geq 1 \\ y_3 \geq y_2 \\ y_3 \geq y_1 \end{cases}, \quad \begin{cases} 0 < y_1 < 1 \\ 0 < y_2 < 1 \\ 0 < y_3 < 1 \end{cases}. \quad (4)$$

Окончательное решение о наличии сигнала будет вынесено в случае, если будут приняты решения  $\Gamma_1$  или  $\Gamma_2$ . Альтернативе соответствуют решения  $\Gamma_0$  или  $\Gamma_3$ .

Таким образом, все пространство выборок  $X$  разбивается не на четыре, а на две непересекающиеся области:  $X_1$ , включающую в себя подобласти, соответствующие решениям  $\Gamma_1$  и  $\Gamma_2$  и  $X_2$ , объединяющую в себе две оставшиеся подобласти.

Тогда, используя (4), условие обнаружения сигнала можно записать как:

$$\begin{cases} y_1 \geq 1 \\ y_1 \geq y_2 \\ y_1 \geq y_3 \end{cases} \quad \vee \quad \begin{cases} y_2 \geq 1 \\ y_2 \geq y_1 \\ y_2 \geq y_3 \end{cases}. \quad (5)$$

Соотношение  $y_1 \geq y_2$  можно исключить из рассмотрения, т. к. при этом всегда принимается решение о наличии сигнала. Переходя к логарифму отношения правдоподобия выражение (5) можно переписать в виде окончательного алгоритма обнаружения сигнала на фоне шума и взаимной помехи:

$$\begin{cases} \ln y_1 \geq 0 \\ \ln y_1 - \ln y_3 \geq 0 \end{cases} \quad \vee \quad \begin{cases} \ln y_2 \geq 0 \\ \ln y_2 - \ln y_3 \geq 0 \end{cases}. \quad (6)$$

Для определения структуры приемника, реализующего данный алгоритм, запишем входящие в (6) отношения правдоподобия в явном виде.

Определим

$$y_1 = \frac{P_1 \omega(\bar{x}/S_1)}{P_0 \omega(\bar{x}/S_0)}.$$

Условное отношение правдоподобия для фиксированного  $\varphi_m$  запишется как [3]:

$$y_1(\bar{x}/\varphi_m) = \frac{P_1}{P_0} \frac{\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_0}} \exp\left\{-\sum_{i=1}^n \frac{(x_i - U_1)^2}{2\sigma_0^2}\right\}}{\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_0}} \exp\left\{-\sum_{i=1}^n \frac{(x_i - U_m)^2}{2\sigma_0^2}\right\}}, \quad (7)$$

где  $U_1$  и  $U_m$  – амплитуды сигнала и помехи;  $\varphi_m$  – случайная фаза помехи.

Переходя к функционалу, усредняя по  $\varphi_m$  и используя условие (1), (7) можно переписать в виде:

$$\ln y_1(t) = \ln \frac{P_1}{P_0} - \frac{E_1}{N_0} + \frac{E_m}{N_0} + 2 \frac{z_1}{N_0} - 2 \frac{z_2}{N_0}, \quad (8)$$

где

$$E_1 = \frac{1}{2} U_1^2 T; \quad E_m = \frac{1}{2} U_m^2 T; \quad z_1 = \int_0^T x(t) U_1(t) dt;$$

$$z_2 = \sqrt{z_{c2}^2 + z_{k2}^2}; \quad z_{c2} = \int_0^T x(t) U_m \cos(\omega_0 t + \varphi_{m0}) dt;$$

$$z_{k2} = \int_0^T x(t) U_m \sin(\omega_0 t + \varphi_{m0}) dt.$$

Отношение правдоподобия

$$y_2 = \frac{P_2 \omega(\bar{x}/S_2)}{P_0 \omega(\bar{x}/S_0)}$$

в явном виде найдено быть не может, но при использовании условия (1) оно допускает асимптотическое разложение [3]. В этом случае

$$\ln y_2(t) = \ln \frac{P_2}{P_0} + 2 \frac{\dot{z}_1}{N_0} - \frac{E_1}{N_0}, \quad (9)$$

где  $\dot{z}_1 = \int_0^T y(t) U_1(t) dt$ ;  $y(t) = f[x(t)]$  – отклик нелинейного безинерционного элемента на входное воздействие  $x(t)$ .

Характеристика нелинейного элемента  $y = f(x)$  для нашего случая определяется из соотношения [3]:

$$f(x) = -\frac{\partial}{\partial x} \ln \omega(x), \quad (10)$$

где  $\omega(x)$  – плотность распределения помехи.

Плотность распределения помехи, представляющую собой смесь белого шума и мешающего сигнала, можно записать как [4]

$$\omega(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_0}} \int_{-1}^1 \frac{\exp\left\{-\frac{(x - U_M z)^2}{2\sigma_0^2}\right\}}{\pi\sqrt{1-z^2}} dz. \quad (11)$$

Используя условие (1), плотность  $\omega(x)$  можно приближенно выразить в виде:

$$\omega(x) = \frac{1}{2\sqrt{2\pi\sigma_0}} \left\{ e^{-(x-U_M)^2/2\sigma_0^2} + e^{-(x+U_M)^2/2\sigma_0^2} \right\}. \quad (12)$$

Соответственно

$$f(x) = -\frac{\partial}{\partial x} \ln \frac{1}{2\sqrt{2\pi\sigma_0}} \left\{ e^{-(x-U_M)^2/2\sigma_0^2} + e^{-(x+U_M)^2/2\sigma_0^2} \right\}. \quad (13)$$

После несложных преобразований характеристика нелинейного элемента представляется в виде:

$$f(x) = \frac{x}{\sigma_0^2} - \frac{U_M}{\sigma_0^2} \operatorname{th} \left( \frac{x U_M}{\sigma_0^2} \right). \quad (14)$$

График зависимости  $y = f(x)$  показан на рис. 1.

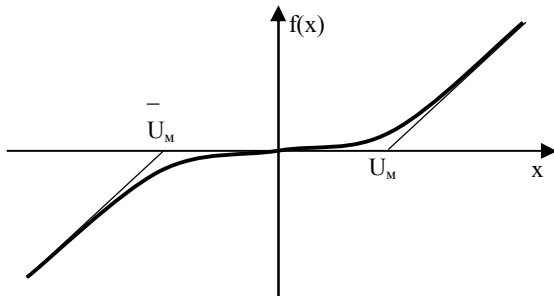


Рис. 1. График зависимости  $y = f(x)$

Аналогично, для  $y_3$  получаем:

$$\ln y_3(t) = \ln \frac{P_3}{P_0} + \frac{E_M}{N_0} - 2 \frac{Z_2}{N_0}. \quad (15)$$

Подставляя (8), (9), (15) в (6), можно записать условие обнаружения сигнала на фоне шума и взаимной помехи:

$$V \left\{ \begin{array}{l} z_1 - Z_2 \geq \frac{N_0}{2} \ln \frac{P_0}{P_1} + \frac{E_1 - E_M}{2} \\ z_1 \geq \frac{N_0}{2} \ln \frac{P_3}{P_1} + \frac{E_1}{2} \end{array} \right. \quad (16)$$

$$V \left\{ \begin{array}{l} \dot{z}_1 \geq \frac{N_0}{2} \ln \frac{P_0}{P_2} + \frac{E_1}{2} \\ \dot{z}_1 + Z_2 \geq \frac{N_0}{2} \ln \frac{P_3}{P_2} + \frac{E_1 + E_M}{2} \end{array} \right.$$

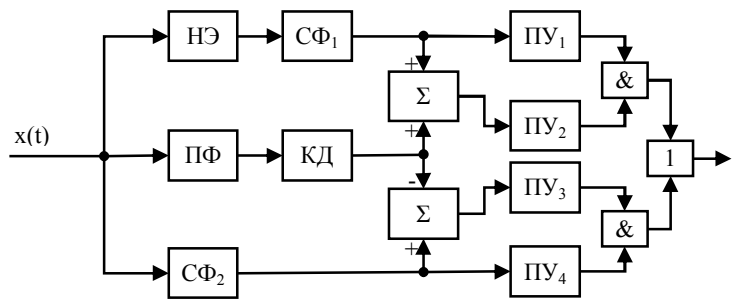


Рис. 2. Структурная схема приемного устройства

Структурная схема приемного устройства, реализующего данный алгоритм, показана на рис. 2 и состоит из нелинейного элемента (НЭ), согласованных фильтров (СФ), полосового фильтра (ПФ), квадратурного детектора (КД), пороговых устройств (ПУ), сумматоров и логических элементов. Таким образом, существует два канала: верхний (НЭ, СФ<sub>1</sub>, ПУ<sub>1</sub>) и нижний (СФ<sub>2</sub>, ПУ<sub>4</sub>), а также третий канал - канал нормировки (ПФ<sub>1</sub>, КД). При наличии пассивной помехи нижний канал отключается, согласно логике, определяемой выражением (16). При отсутствии помех работает нижний канал схемы, согласно той же логике. Уровни порогов пороговых устройств (ПУ<sub>1</sub>-ПУ<sub>4</sub>) определяются исходя из заданной вероятности правильного обнаружения или заданной вероятности ложной тревоги.

### Выводы

В статье проведен синтез обнаружителя, работающего в условиях шумовых и интенсивных пассивных помех с широким доплеровским спектром. Такой подход может быть использован как при обнаружении целей, так и при измерении их параметров в РЛС приморского базирования с целью увеличения дальности и точности определения координат целей.

### Список литературы

1. Теоретические основы радиолокации / Под ред. Я.Д. Ширмана. – М.: Сов. радио, 1970. – 560 с.
2. Радиоэлектронные системы: основы построения и теория. / Под ред. Я.Д. Ширмана. – М.: ЗАО «МАК-ВИС», 1998. – 828 с.
3. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. – М.: Сов. радио, 1969. – 752 с.
4. Тихонов В.И., Харисов В.Н. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем. – М.: Радио и связь, 1991. – 608 с.
5. О возможности повышения эффективности РЛС приморского базирования при локации протяженных аэродинамических целей в условиях пассивных помех типа «ангел-эх» / В.Д. Карлов, И.Г. Леонов и др. // Збірник наукових праць. – Севастополь: СВМІ, 2003. – Вип. 3. – С. 71–75.

Поступила в редколлегию 11.09.2006

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