

## УСТРОЙСТВО СТАБИЛИЗАЦИИ ВЕРОЯТНОСТИ ЛОЖНОЙ ТРЕВОГИ, ИСПОЛЬЗУЮЩЕЕ ПОРЯДКОВЫЕ СТАТИСТИКИ И РАЗЛИЧНУЮ ЛОГИКУ НА ЭЛЕМЕНТАХ «ОКНА»

д.т.н., проф. Ф.М. Андреев, О.А. Барданова, к.т.н. Р.Э. Пащенко,  
Ю.И. Рафальский, С.В. Яровой

*Предлагается структура устройства стабилизации вероятности ложной тревоги, использующего порядковые статистики и различную логику на элементах «окна»; проведена оценка показателей качества обнаружения устройств СВЛТ, использующих логику выбора «большей из» и «меньшей из» двух порядковых статистик.*

**Постановка проблемы.** Анализ воздействия на РЛС нестационарных помех показывает, что изменение интенсивности и функции распределения вероятности входной смеси сигнала с помехой существенно ухудшает эффективность обнаружения. Необходимость стабилизации вероятности ложной тревоги при работе в условиях наличия нестационарных помех требует введения в тракт обработки сигналов быстродействующих адаптивных пороговых устройств. Для этой цели могут быть использованы устройства стабилизации вероятности ложной тревоги (СВЛТ).

**Анализ литературы.** Устройства СВЛТ обычно строятся по принципу «скользящего окна» с последующей оценкой неизвестной дисперсии помехового фона. В зависимости от способа определения дисперсии выделяют четыре класса устройств СВЛТ: с усреднением мощности по элементам «окна» [1]; с использованием различной логики на элементах «окна» [2]; на основе порядковых статистик [3]; адаптивные к параметрам нерелеевских распределений амплитуд помех [4].

При воздействии нестационарных помех и при работе в сложной целевой обстановке наиболее эффективным является устройство СВЛТ на порядковых статистиках. Номер порядковой статистики  $K$  рекомендовано выбирать  $K = \frac{3}{4}N$ , где  $N$  – размер «скользящего окна» [3]. Такое устройство СВЛТ использует значение (величину амплитуды)  $K$ -й порядковой статистики  $X(K)$  в качестве оценки дисперсии помехи  $Z$ , по которой вырабатывается требуемое значение порога [3]:

$$U_{\Pi} = T \cdot Z = T \cdot X_{(K)}, \quad (1)$$

где  $T$  – пороговая константа, определяемая величиной вероятности ложной тревоги  $P_F$ .

**Цель статьи.** Рассмотреть структуру устройства СВЛТ, в котором используются порядковые статистики и различная логика на элементах «окна», а также проанализировать показатели качества обнаружения предлагаемых устройств.

**Структура устройства СВЛТ,** использующего порядковые статистики и различную логику на элементах «окна». В таких устройствах вначале находится  $K$ -е значение порядковой статистики из первой половины «скользящего окна» (расположенных слева от контрольного элемента  $X_0$ )  $X_{(K)}^1$  и  $K$ -е значение порядковой статистики из второй половины «скользящего окна» (расположенных справа от контрольного элемента  $X_0$ )  $X_{(K)}^2$ , а затем максимальная (логика выбора «большой из») или минимальная (логика выбора «меньшей из») из этих порядковых статистик выбирается для формирования порогового уровня. Оценка дисперсии помехи может быть представлена в следующем виде:

$$Z_1 = \max(X_{(K)}^1, X_{(K)}^2), \quad Z_2 = \min(X_{(K)}^1, X_{(K)}^2). \quad (2)$$

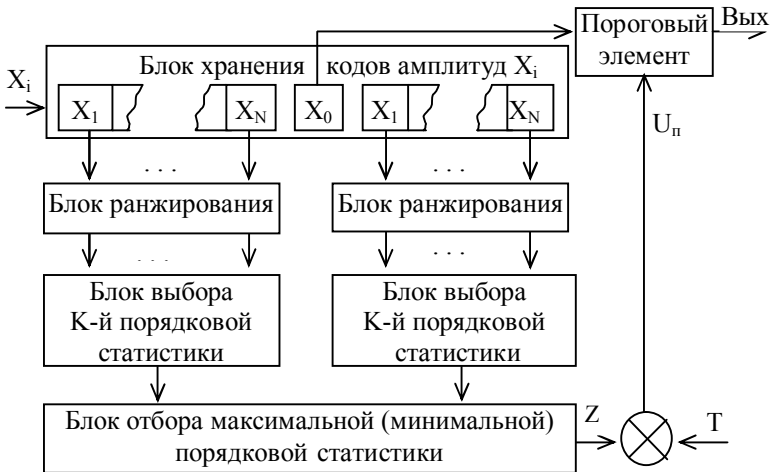


Рис. 1. Устройство СВЛТ, использующее порядковые статистики и различную логику на элементах «окна»

Структурная схема устройств СВЛТ, использующих порядковые статистики и различную логику на элементах «окна», показана на рис. 1.

Блоки хранения кодов амплитуд, ранжирования и выбора  $K$ -й порядковой статистики функционируют как в обычном устройстве СВЛТ на порядковых статистиках, а оценка дисперсии помехи формируется согласно выражений (2) в блоке отбора максимальной (минимальной) порядковой статистики. Коды амплитуд сигналов  $X_i$  поступают в блок хранения последовательно. Пороговый уровень  $U_n$  формируется в результате перемножения оценки дисперсии помехи  $Z$  и пороговой константы  $T$ , которая зависит от вероятности ложной тревоги. С порогом сравнивается код амплитуды элемента, находящегося в середине анализируемой выборки  $X_0$ . В случае превышения порогового уровня на выходе порогового элемента формируется сигнал логической единицы, свидетельствующий о наличии цели, в противном случае сигнал логического нуля – цели нет. Процедура формирования порогового уровня и обнаружения сигнала в дальнейшем повторяется для обновленной на один элемент выборки.

**Сравнение устройств СВЛТ.** Сравним показатели качества обнаружения обычного устройства СВЛТ на порядковых статистиках и использующих различную логику на элементах «окна».

Выражение для вероятности правильного обнаружения устройства СВЛТ имеет вид

$$P_D = \int_0^{\infty} P(X_0 > U_n) \cdot f(U_n) \cdot dU_n, \quad (3)$$

где  $U_n$  – пороговый уровень;  $P(X_0 > U_n)$  – условная вероятность превышения порога  $U_n$  сигналом от цели;  $f(U_n)$  – плотность вероятности распределения порогового уровня.

Для цели с релейскими флуктуациями амплитуды условная вероятность превышения нормированного порога  $U_n^H$  определяется выражением [5]:

$$P(X_0 > U_n^H) = \exp\left(-\frac{U_n^H}{1+q^2}\right), \quad (4)$$

где  $q$  – отношение сигнал/помеха по мощности.

Помеху полагаем гауссовой. При квадратичном детектировании нормированные относительно среднеквадратического отклонения помехи выборки  $X_i$  имеют экспоненциальную плотность вероятности

$$f(X_i) = \exp(-X_i), \quad X_i > 0, \quad i = \overline{1, N}, \quad (5)$$

а функция распределения

$$F(X_i) = 1 - \exp(-X_i), \quad X_i > 0, \quad i = \overline{1, N}. \quad (6)$$

В общем случае плотность вероятности  $K$ -й порядковой статистики равна [6]:

$$f_{(K)}(X) = K \cdot C_N^K \cdot f(X) [F(X)]^{K-1} [1 - F(X)]^{N-K}. \quad (7)$$

Подставляя (5) и (6) в выражение (7), получим плотность вероятности

$$f_{(K)}(X) = K \cdot C_N^K \cdot e^{-(N-K+1)X} (1 - e^{-X})^{K-1} \quad (8)$$

и функцию распределения  $K$ -й порядковой статистики

$$F_{(K)}(X) = K \cdot C_N^K \sum_{i=0}^{K-1} (-1)^i \cdot \frac{C_{K-1}^i}{N - K + i + 1} \left[ 1 - e^{-(N-K+i+1)X} \right], \quad (9)$$

где  $C_N^K$  – число сочетаний из  $N$  по  $K$ .

На втором этапе работы устройства СВЛТ имеем дело с вариационным рядом, состоящим из двух значений  $X_{(K)}^1$  и  $X_{(K)}^2$ . Тогда согласно (7) для оценки  $Z_1$  дисперсии помехи плотность распределения максимальной порядковой статистики равна [7]:

$$f(Z) = 2 \cdot f_{(K)}(Z) \cdot F_{(K)}(Z), \quad (10)$$

а для оценки  $Z_2$ :

$$f(Z) = 2 \cdot f_{(K)}(Z) \cdot [1 - F_{(K)}(Z)]. \quad (11)$$

С учетом известных правил преобразования законов распределения случайных величин для обычного устройства СВЛТ на порядковых статистиках плотность вероятности распределения случайного порога  $U_{\Pi}$  будет равна

$$f^{nc}(U_{\Pi}) = \frac{1}{T} f_{(K)}\left(\frac{U_{\Pi}}{T}\right) = \frac{1}{T} K \cdot C_N^K \cdot e^{-(N-K+1)\frac{U_{\Pi}}{T}} \left(1 - e^{-\frac{U_{\Pi}}{T}}\right)^{K-1}, \quad (12)$$

для рассматриваемого устройства СВЛТ в первом случае

$$f^{\max}(U_{\Pi}) = \frac{2}{T} \left(K \cdot C_N^K\right)^2 e^{-(N-K+1)\frac{U_{\Pi}}{T}} \left(1 - e^{-\frac{U_{\Pi}}{T}}\right)^{K-1} \sum_{i=0}^{K-1} (-1)^i \frac{C_{K-1}^i}{N - K + i + 1} \times \left[ 1 - e^{-(N-K+i+1)\frac{U_{\Pi}}{T}} \right], \quad (13)$$

а во втором случае

$$f^{\min}(U_{\Pi}) = 2 \cdot f^{nc}(U_{\Pi}) - f^{\max}(U_{\Pi}). \quad (14)$$

После подстановки (4), (12), (13) и (14) в (3) и вычисления интегралов получим выражения для вероятности правильного обнаружения обычного устройства СВЛТ на порядковых статистиках

$$P_D^{nc} = K \cdot C_N^K \cdot B(N + K + \beta T + 1, K), \quad (15)$$

где  $B(X, Y)$  – бета-функция;  $\beta = \frac{1}{1+q^2}$ .

Для рассматриваемого устройства СВЛТ в первом случае

$$P_D^{\max} = 2 \left( K \cdot C_N^K \right)^2 \sum_{i=0}^{K-1} (-1)^i \frac{C_{K-1}^i}{N-K+i+1} \left[ \sum_{j=0}^{K-1} (-1)^j \frac{C_K^j}{N-K+\beta \cdot T_{\max} + j+1} - \sum_{n=0}^{K-1} (-1)^n \frac{C_K^n}{2(N-K+1)+i+n+\beta \cdot T_{\max}} \right], \quad (16)$$

а во втором

$$P_D^{\min} = 2 \cdot P_D^{\text{pc}} - P_D^{\max}. \quad (17)$$

Заметим, что в [3] выражение для  $P_D^{\text{pc}}$  приведено в виде

$$P_D^{\text{pc}} = K \cdot C_N^K \frac{(K-1)! (\beta \cdot T + N - K)!}{(\beta \cdot T + N)!}, \quad (18)$$

которое является частным случаем (15) для целочисленных значений аргумента  $X$  бета-функции. Значения пороговых констант  $T$  для обычного устройства СВЛТ на порядковых статистиках табулированы в [3].

Выражения для вероятности ложной тревоги устройств СВЛТ, использующих порядковые статистики и различную логику на элементах «окна», получаются из выражений (16) и (17) подстановкой  $\beta = 1$ . Задавшись необходимым значением вероятности ложной тревоги, методом последовательных итераций из выражений (16) и (17) при  $\beta = 1$  находим численные значения пороговых констант  $T_{\max}$  и  $T_{\min}$  соответственно. Численные значения пороговой константы при  $P_F = 10^{-6}$ ,  $K = \frac{3}{4}N$  и  $N = 16$  равны  $T_{\max} = 19,2$  и  $T_{\min} = 22,04$ .

На рис. 2 показаны кривые вероятности правильного обнаружения цели, полученные с использованием выражений (15), (16) и (17).

Кривые построены при  $N = 16$ ,  $K = \frac{3}{4}N$  и  $P_F = 10^{-6}$ , кривая 1 – для устройства СВЛТ на порядковых статистиках, использующего логику выбора «меньшей из» двух порядковых статистик, кривая 2 – использующего логику выбора «большей из» двух порядковых статистик, кривая 3 – для обычного устройства СВЛТ на порядковых статистиках.

Как видно из хода кривых в рассматриваемых устройствах потери в пороговом отношении сигнал/помеха уменьшаются. Кроме того, устройство СВЛТ, использующее логику выбора «меньшей из» двух порядковых статистик, обладает лучшими показателями, чем устройство СВЛТ, использующее логику выбора «большей из» двух порядковых статистик.

Физически появление выигрыша в вероятности правильного обнаружения сигналов объясняется увеличением эквивалентного размера выборки до  $2N$  вместо  $N$  как в обычном устройстве СВЛТ. Это приводит к более точному вычислению оценки неизвестной дисперсии помехи.

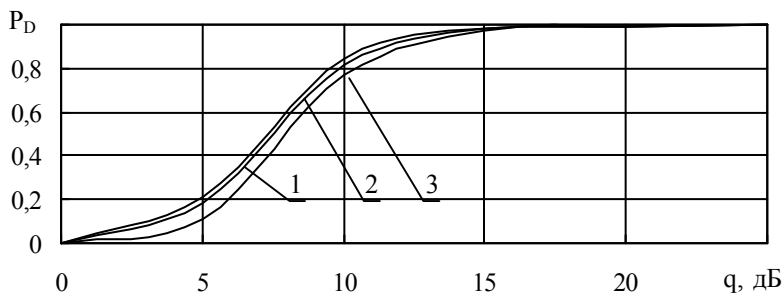


Рис. 2. Кривые вероятности правильного обнаружения цели

В обычном устройстве СВЛТ на порядковых статистиках увеличение размера «скользящего окна» до  $2N$ , наряду с повышением точности оценки неизвестной дисперсии помехи, приводит к увеличению продолжительности переходных процессов при появлении резких перепадов интенсивности помехи. Продолжительность переходного процесса для устройства на порядковых статистиках равна размеру так называемой «предохранительной зоны», равной  $K - 0,5N$  [3]. В пределах этой зоны уровень порога становится больше необходимого значения и постепенно растет. Это позволяет к моменту появления перепада интенсивности помехи в анализируемой (сравниваемой с порогом) выборке  $X_0$  обеспечить уровень порога, необходимый для установления заданного уровня вероятности ложной тревоги. В случае  $N = 16$  и рекомендованного в [3] значения  $K = \frac{3}{4}N$  продолжительность переходного процесса равна  $K - 0,5N = 4$  элемента «скользящего окна», т.е. используется 4 выборки помехи для оценки неизвестной дисперсии помехи, обеспечивающей необходимую точность стабилизации вероятности ложной тревоги. В случае увеличения размера «скользящего окна»  $N$  в два раза, например, с  $N = 16$  до  $N = 32$ , требуется вдвое больше выборок помехи для оценки ее дисперсии к моменту поступления перепада интенсивности помехи в анализируемую выборку (длительность переходного процесса равна  $K - 0,5N = 8$  элементов «скользящего окна»). В устройствах СВЛТ, использующих порядковые статистики и различную логику на элементах «окна», при эквивалентном размере выборки, равном 32 элемента, длительность переходного процесса будет составлять  $K - 0,5N = 4$  элемента «сколь-

зящего окна». Кроме того, увеличение размера «скользящего окна» в обычном устройстве СВЛТ на порядковых статистиках приводит к увеличению времени на обработку кодов амплитуд сигналов в блоке ранжирования, т.к. увеличивается число операций сравнения при сортировке большей выборки. В рассматриваемых устройствах СВЛТ их быстродействие не изменится.

**Выводы.** Устройство стабилизации вероятности ложной тревоги, использующее логику выбора большей из двух порядковых статистик, позволит повысить вероятность правильного обнаружения сигналов не увеличивая длительность переходного процесса. Кроме того, увеличение эквивалентного размера выборки в два раза не приводит к ухудшению быстродействия устройства.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бакулев П.А., Басистов Ю.А., Тугуши В.Г. *Обработка сигналов постоянным уровнем ложных тревог (обзор)* // *Радиоэлектроника (Изв. высш. учеб. заведений)*. – 1989. – Т. 32. – № 4. – С. 4 – 15.
2. Волков В.Ю., Оводенко А.А. *Робастные алгоритмы выделения локационных сигналов* // *Зарубежная радиоэлектроника*. – 1981. – № 5. – С. 16 – 20.
3. Rohling H. *Radar CFAR thresholding in Clutter and Multiple target situation* // *IEEE Jrans.: VAES* – 19. – 1983. – № 4. – P. 601 – 621.
4. Hansen V.G., Ward H.R. *Detection performance of the cell average LOG/CFAR receiver* // *IEEE Trans.: V.AES* – 8. – 1972. – № 5. – P. 648 – 652.
5. *Современная радиолокация.* / Пер. с англ. под ред. Ю.Б. Кобзарева. – М.: Сов. радио, 1969. – 704 с.
6. Сархан А.Е., Гринберг Б.Г. *Введение в теорию порядковых статистик.* / Пер. с англ. под ред. А.Я. Боярского – М.: Статистика, 1970. – 378 с.
7. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. *Прикладные задачи теории вероятностей.* – М.: Радио и связь, 1983. – 415 с.

Поступила 22.10.2003

**АНДРЕЕВ Феликс Михайлович**, доктор техн. наук, профессор, профессор кафедры ХВУ. Окончил Харьковскую ВИРТА ПВО. Область научных интересов – первичная обработка информации.

**БАРДАНОВА Ольга Андреевна**, инженер учебной лаборатории кафедры ХВУ. Окончила Харьковский институт радиоэлектроники в 1984 году. Область научных интересов – первичная обработка информации.

**ПАЩЕНКО Руслан Эдуардович**, канд. техн. наук, доцент, профессор кафедры ХВУ. Окончил Житомирское ВУРЭ ПВО в 1987 году. Область научных интересов – первичная обработка сигналов, фрактальный анализ.

**РАФАЛЬСКИЙ Юрий Иванович**, начальник факультета ХВУ. Окончил ВКА ПВО им. Г.К. Жукова. Область научных интересов – первичная обработка информации.

**ЯРОВОЙ Сергей Владимирович**, инженер учебной лаборатории кафедры ХВУ. Окончил Харьковский военный университет в 1997 году. Область научных интересов – первичная обработка информации.