УДК 621.396

АДАПТИВНЫЙ АЛГОРИТМ СТАБИЛИЗАЦИИ УРОВНЯ ЛОЖНОЙ ТРЕВОГИ НА ОСНОВЕ ПРОВЕРКИ СТАЦИОНАРНОСТИ ШУМА В ПРЕДЕЛАХ «СКОЛЬЗЯЩЕГО» ОКНА

Белокуров В.А., *д.т.н., профессор кафедры РТС РГРТУ, e-mail: belokurov.v.a@rsreu.ru*
Нгуен Ч. К., *аспирант кафедры РТС РГРТУ, e-mail: trongquang3883686@gmail.com*

AN ADAPTIVE CONSTANT FALSE ALARM RATE ALGORITHM BASED ON CHECKING THE STATIONARITY OF NOISE WITHIN «SLIDING» WINDOW

Belokurov V.A., Nguyen Q.T.

An adaptive algorithm for stabilizing the false alarm level based on checking the stationarity of noise within a «sliding» window is proposed. The aim of the work is to synthesize and analyze the efficiency of the proposed algorithm in comparison with the CA-CFAR algorithm against a background of stationary and non-stationary noise. The algorithm is based on testing the noise readings of a «sliding» window for the stationarity of the average value. For this purpose, the Mann-Whitney algorithm is used. After that, the readings are sent to one of the channels corresponding to the selected model: a) stationary noise; b) non-stationary noise, the average value can be approximated by a linear dependence; c) non-stationary noise, the average value can be approximated by a quadratic dependence. The results of the analysis show that the proposed algorithm provides a gain in the threshold signal-to-noise ratio of up to 7.8 dB compared to the CA-CFAR algorithm against a background of non-stationary noise.

Key words: constant false alarm rate, criterion for checking the stationarity of noise, trend estimation.

Ключевые слова: стабилизация уровня ложных тревог, критерий проверки стационарности шума, оценка тренда.

Предложен адаптивный алгоритм стабилизации уровня ложной тревоги на основе проверки стационарности шума в пределах «скользящего» окна. Цель работы заключается в синтезе и анализе эффективности предлагаемого алгоритма по сравнению с алгоритмом УС-СУЛТ на фоне стационарного и нестационарного шума. В основе алгоритма лежит тестирование отсчётов шума «скользящего» окна на стационарность среднего значения. Для этого используется алгоритм Манна-Уитни. После этого отсчёты поступают в один из каналов, соответствующих выбранной модели: а) шум стационарный; б) шум нестационарный, среднее значение может быть аппроксимировано линейной зависимостью; в) шум нестационарный, среднее значение может быть аппроксимировано квадратичной зависимостью.

Результаты анализа показывают, что предлагаемый алгоритм обеспечивает выигрыш в пороговом отношении сигнал-шум до 7,8 дБ по сравнению с алгоритмом УС-СУЛТ на фоне нестационарного шума.

Введение

В условиях параметрической неопределённости параметров шума на практике для обнаружения различных объектов применяют адаптивные пороговые обнаружители, которые обеспечивают стабилизацию уровня ложной тревоги (СУЛТ). Известны алгоритмы СУЛТ, основанные на оценке среднего уровня шума, алгоритм СУЛТ с усреднением по ячейкам (УС-СУЛТ) [1] и его вариации, такие как алгоритм СУЛТ «большего из» (Би-УС-СУЛТ) и «меньшего из» (Ми-УС-СУЛТ) [2], а также алгоритмы, основанные на использовании порядковых статистик (ПС-СУЛТ). В случае если параметры шума не меняются в пределах «скользящего» окна, то УС-СУЛТ обеспечивает минимальные потери в пороговом отношении сигнал-шум [3]. Однако эффективность алгоритма УС-СУЛТ уменьшается в случае, если среднее значение уровня шума в пределах «скользящего» окна изменяется.

В работе [4] предложен автоматический цензурированный обнаружитель СУЛТ на основе упорядоченной изменчивости выборок. В работе [5] предлагается обнаружитель СУЛТ, называемый адаптивным линейным комбинированным обнаружителем СУЛТ, принцип работы которого заключается в адаптивном комбинировании пороговых оценок обнаружителей УС-СУЛТ и обнаружителей ПС-СУЛТ. Предлагаемый обнаружитель СУЛТ адаптируется к условиям обнаружения на фоне стационарности или в присутствии мешающих объектов путем изменения весового коэффициента, который вычисляется на основе опорного «окна» выборки. В работе [6] рассмотрен обнаружитель СУЛТ, который оценивает свойства фона по разнице мощностей соседних опорных ячеек и выбирает оптимальный порог обнаружения на основе двух алгоритмов УС-СУЛТ и ПС-СУЛТ. В работе [7] рассмотрен обнаружитель, который использует критерий согласия для проверки гипотезы стационарности выборки. Если фон является стационарным, то применяется алгоритм УС-СУЛТ. В противном случае - алгоритм двойного цензурирования.

Из анализа рассмотренных источников видно, что предлагаемые обнаружители СУЛТ имеют следующие недостатки:

– изменение среднего значения уровня шума в пределах «скользящего» окна не учитывается;

– требуются существенные вычислительные затраты.

Предлагаемый в данной работе адаптивный обнаружитель СУЛТ реализует адаптивный выбор порога обнаружения на основе проверки стационарности шума в пределах «скользящего» окна с последующим выбором модели изменения среднего значения уровня шума.

Постановка задачи

На рисунке 1 показан спектр отражённого радиолокационного сигнала в одном из каналов по скорости, полученный путём обработки отражённых сигналов в РЛС с непрерывным излучением. На рисунке представлен результат накопления сигнала в каналах по дальности при нулевом доплеровском сдвиге.

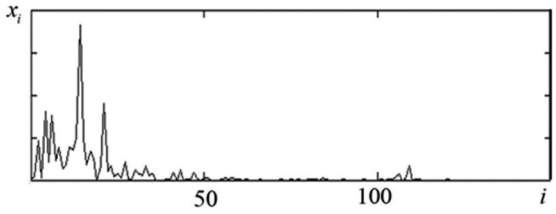


Рисунок 1. Отраженный радиолокационный сигнал в канале по скорости с нулевым доплеровским сдвигом

На рисунке 1 введены следующие обозначения: x_i – спектральные отсчёты, соответствующие каналам дальности; $i = 0...N-1$; N – число каналов по дальности. В случае использования импульсной РЛС подобный сигнал будет характерен для каналов по дальности в канале по скорости с нулевым доплеровским сдвигом.

В случае импульсной РЛС отсчёты $\{x_i\}_{i=0}^{N-1}$ представляют собой квадраты модулей выходных отсчётов корреляционно-фильтровой схемы обработки отражённых радиолокационных сигналов, соответствующие одному каналу по скорости. В случае РЛС с непрерывным излучением отсчёты $\{x_i\}_{i=0}^{N-1}$ являются квадратами модулей выходных отсчётов двумерного ДПФ и соответствуют каналам по дальности одного канала по скорости. В РЛС с непрерывным излучением в каждом периоде модуляции реализуется операция БПФ над отсчётами принятого сигнала.

Рассмотрим процесс формирования одномерного «скользящего» окна $\mathbf{z}_k$, показанный на рисунке 2.

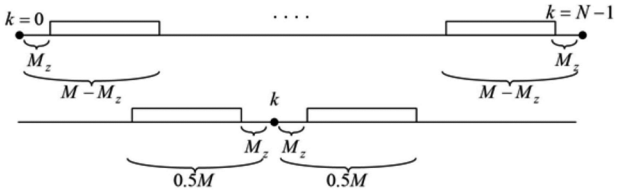


Рисунок 2. Формирование «скользящего» окна для k-го канала обнаружения

На рисунке 2 введены следующие обозначения: M – размер «скользящего» окна; M_z – размер защитного интервала. Отсчёты, входящие в защитный интервал M_z, не используются в вычислениях параметров шума соответствующего блока СУЛТ. Входные отсчёты k-го блока СУЛТ $\mathbf{z}_k = \{z_{k_i}\}_{i=0}^{M-2M_z-1}$ определяются следующим образом:

$$\mathbf{z}_k = \{z_{k_i}\}_{i=0}^{M-2M_z-1} = \quad (1)$$

$$= \begin{cases} \{x_j\}_{j=k-0.5M}^{k-1-M_z} \cup \{x_j\}_{j=k+1+M_z}^{k+0.5M}, если\ k = 0,5M...N-1-0,5M \\ \{x_j\}_{j=k+1+M_z}^{k+1+M-M_z},\ если\ k < 0,5M \\ \{x_j\}_{j=k-1-M+M_z}^{k-1-M_z},\ если\ k > N-1-0,5M \end{cases}$$

Таким образом, для вычисления параметров шума для каждого k-го канала обнаружения используется $M-2M_z$ отсчётов «скользящего» окна k-го блока СУЛТ, отсчёт x_k также не используется при вычислении параметров шума. В массиве $\mathbf{z}_k = \{z_{k_i}\}_{i=0}^{M-2M_z-1}$ каждый i-й элемент определяется в соответствии с выражением (1).

Если среднее значение уровня шума не меняется, то алгоритм УС-СУЛТ обеспечивает минимальные потери в пороговом отношении сигнал-шум по сравнению с другими алгоритмами СУЛТ. В случае изменения среднего значения уровня шума эффективность алгоритма УС-СУЛТ существенно снижается [9-12].

Предлагаемый алгоритм СУЛТ на фоне шума с нестационарным средним значением

Для решения данной проблемы в работе предлагается ввести предварительное тестирование отсчётов шума массива $\mathbf{z}_k$ на стационарность с помощью одного из непараметрических критериев, в частности критерия Манна – Уитни [13], и последующую оценку модели изменения среднего значения уровня шума.

На рисунке 3 представлена структурная схема предлагаемого адаптивного алгоритма СУЛТ на основе проверки стационарности шума в k-м блоке СУЛТ.

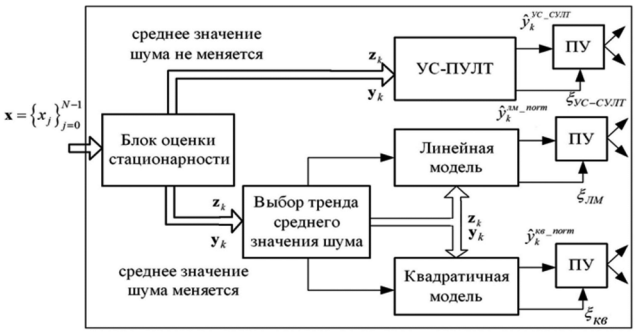


Рисунок 3. Структурная схема предлагаемого адаптивного алгоритма СУЛТ на основе проверки стационарности шума

На рисунке 3 введены обозначения: ПУ – пороговое устройство; $\xi_{УС-СУЛТ}, \xi_{ЛМ}, \xi_{КВ}$ – пороги обнаружения; $\hat{y}_k^{УС_СУЛТ}$, $\hat{y}_k^{ЛМ_norm}$, $\hat{y}_k^{КВ_norm}$ – значения решающих статистик в k-м канале обнаружения; y_k – массив, включающий элементы массива $\mathbf{z}_k$, элементы, входящие в защитный интервал, а также элемент, который сравнивается с порогом обнаружения. Согласно представленной на рисунке 3 структурной схеме алгоритм работы следующий.

На вход предлагаемого СУЛТ процессора поступает массив $\mathbf{x} = \{x_j\}_{j=0}^{N-1}$, отсчёты которого представляют собой результаты вычисления достаточных статистик в каналах обнаружения корреляционно-фильтровой схемы обнаружения отражённых радиолокационных сигналов [8]. Для k-го канала обнаружения формируются два массива: z_k и y_k размерами M - $2M_z$ и M + 1 соответственно.

Отсчёты массива z_k поступают в «Блок оценки стационарности». В данном блоке осуществляется тестирование входной выборки на стационарность. Для этого используется критерий Манна – Уитни [13], согласно которому на основе отсчётов z_k вычисляется значение эмпи-

рической статистики по критерию Манна – Уитни $z_{MУ}$ в соответствии с выражением:

$$z_{MУ} = \left| \frac{U - \frac{n_1 n_2}{2}}{\sqrt{\frac{n_1 n_2 (n_1 + n_2 + 1)}{12}}} \right|, \quad (2)$$

где n_1 – объём первой подвыборки входного массива z_k k-го блока СУЛТ; $n_1 = 0,5M - M_z$; n_2 – объём второй подвыборки входного массива z_k k-го блока СУЛТ; $n_2 = 0,5M - M_z$. Случайная величина U в выражении (2) вычисляется следующим образом [13]:

$$U = \min\{U_1, U_2\},$$

где $U_1 = \sum_{j=0}^{0.5M-M_z-1} \sum_{i=0.5M-M_z}^{M-2M_z-1} \begin{cases} 1, если\ z_{k_j} > z_{k_i} \\ 0, если\ z_{k_j} \le z_{k_i} \end{cases}$;

$U_2 = \sum_{j=0}^{0.5M-M_z-1} \sum_{i=0.5M-M_z}^{M-2M_z-1} \begin{cases} 1, если\ z_{k_j} \le z_{k_i} \\ 0, если\ z_{k_j} > z_{k_i} \end{cases}$.

В общем случае значения n_1 и n_2 могут быть не равны. В данной работе $n_1 = n_2$.

В случае превышения статистикой $z_{MУ}$ критического значения $z_{кр}$ выносится решение о том, что шум нестационарный. В противном случае выносится решение о стационарности шума и дальнейшая обработка выполняется в известном алгоритме УС-СУЛТ.

В случае принятия решения о нестационарности шума в k-м «скользящем» окне отсчёты z_k поступают в блок «Выбор тренда среднего значения шума». В данном блоке происходит выбор закона аппроксимации изменения среднего значения шума.

В рамках данной работы рассматриваются предположения о линейном и квадратичном характере изменения среднего значения шума в пределах «скользящего» окна:

$$b_k^{лм} i + c_k^{лм}, \quad (3)$$

$$a_k^{кв} i^2 + b_k^{кв} i + c_k^{кв}, \quad (4)$$

где $a_k^{кв}$, $b_k^{кв}$, $c_k^{кв}$ – параметры, описывающие изменение среднего значения шума в пределах k-го блока СУЛТ при использовании квадратичной аппроксимации; $b_k^{лм}$, $c_k^{лм}$ – параметры, описывающие изменение среднего значения шума в пределах k-го блока СУЛТ при использовании линейной аппроксимации; $i = 0,1...M$. Коэффициенты $a_k^{кв}$, $b_k^{кв}$, $c_k^{кв}$, $b_k^{лм}$, $c_k^{лм}$ вычисляются на основе метода наименьших квадратов [14] и отсчётов массива z_k. При вычислении коэффициентов $a_k^{кв}$, $b_k^{кв}$, $c_k^{кв}$, $b_k^{лм}$, $c_k^{лм}$ входные отсчёты k-го блока СУЛТ, попадающие в защитный интервал размером $2M_z$, не используются.

Выбор модели тренда осуществляется следующим образом:

а) на основе метода наименьших квадратов вычисляются оценки параметров $a_k^{кв}$, $b_k^{кв}$, $c_k^{кв}$, $b_k^{лм}$, $c_k^{лм}$ в соответствии с выражениями:

– для линейной аппроксимации:

$$\hat{b}_k^{лм} = \sum_{i=0}^{M-2M_z-1} \left\{ \begin{matrix} z_{k_i} [6(2i - (M-2M_z) - 1) \times \\ \times ((M-2M_z)((M-2M_z)^2 - 1)^{-1})] \end{matrix} \right\}, \quad (5)$$

$$\hat{c}_k^{лм} = \sum_{i=0}^{M-2M_z-1} \left\{ \begin{matrix} z_{k_i} [2(2(M-2M_z) + 1 - 3i) \times \\ \times ((M-2M_z)\left((M-2M_z) - 1\right)^{-1})] \end{matrix} \right\}, \quad (6)$$

где $\mathbf{z}_k = \left\{ z_{k_i} \right\}_{i=0}^{M-2M_z-1}$ – отсчёты k-го блока СУЛТ, определяемые в соответствии с выражением (1); $\hat{b}_k^{лм}$, $\hat{c}_k^{лм}$ – оценки коэффициентов $b_k^{лм}$, $c_k^{лм}$;

– для квадратичной аппроксимации:

$$\hat{a}_k^{кв} = \det\begin{pmatrix} M & X1 & Z1 \\ X1 & X2 & Z2 \\ X2 & X3 & Z3 \end{pmatrix} \left(\det\begin{pmatrix} M & X1 & X2 \\ X1 & X2 & Z3 \\ X2 & X3 & Z4 \end{pmatrix} \right)^{-1},$$

$$\hat{b}_k^{кв} = \det\begin{pmatrix} M & Z1 & X2 \\ X1 & Z2 & X3 \\ X2 & Z3 & X4 \end{pmatrix} \left(\det\begin{pmatrix} M & X1 & X2 \\ X1 & X2 & Z3 \\ X2 & X3 & X4 \end{pmatrix} \right)^{-1}, \quad (7)$$

$$\hat{c}_k^{кв} = \det\begin{pmatrix} Z1 & X1 & X2 \\ Z2 & X2 & X3 \\ Z3 & X3 & X4 \end{pmatrix} \left(\det\begin{pmatrix} M & X1 & X2 \\ X1 & X2 & X3 \\ X2 & X3 & X4 \end{pmatrix} \right)^{-1},$$

где $\det(\bullet)$ – определитель матрицы; $X1 = \sum_{i=1}^{M-2M_z} i$;

$X2 = \sum_{i=1}^{M-2M_z} i^2$; $X3 = \sum_{i=1}^{M-2M_z} i^3$; $X4 = \sum_{i=1}^{M-2M_z} i^4$;

$Z1 = \sum_{i=1}^{M-2M_z} z_{k_i}$; $Z2 = \sum_{i=1}^{M-2M_z} \left(i\, z_{k_i} \right)$; $Z3 = \sum_{i=1}^{M-2M_z} \left(i^2\, z_{k_i} \right)$;

$\hat{a}_k^{кв}$, $\hat{b}_k^{кв}$, $\hat{c}_k^{кв}$ – оценки коэффициентов $a_k^{кв}$, $b_k^{кв}$, $c_k^{кв}$;

б) обозначим $\mathbf{y}_k$ массив с элементами:

$$\mathbf{y}_k = \begin{cases} \{x_j\}_{j=k-0.5M}^{k+0.5M},\ если\ k = 0,5M...N-1-0,5M; \\ \{x_j\}_{j=k}^{k+M},\ если\ k < 0,5M; \\ \{x_j\}_{j=k-M}^{k},\ если\ k > N-1-0,5M. \end{cases} \quad (8)$$

Размер массива y_k равен M+1. В данный массив входят элементы массива z_k, а также отсчёты, попадающие в защитный интервал, и отсчёт z_k, для которого вычисляется порог обнаружения. Каждый i-й элемент массива y_{k_i} определяется в соответствии с выражением (8).

Проведём вычитание аппроксимированного значения среднего значения шума из элементов массива $\mathbf{y}_k$:

$$\hat{y}_{k_i}^{лм} = y_{k_i} - (\hat{b}_k^{лм} i + \hat{c}_k^{лм}), \quad (9)$$

$$\hat{y}_{k_i}^{кв} = y_{k_i} - (\hat{a}_k^{кв} i^2 + \hat{b}_k^{кв} i + \hat{c}_k^{кв}), \quad (10)$$

где $i = 0,1...M$. Элементы $\hat{y}_{k_i}^{лм}$ определяют массив $\hat{\mathbf{y}}_k^{лм} = \{\hat{y}_{k_i}^{лм}\}_{i=0}^{M}$. Элементы $\hat{y}_{k_i}^{кв}$ определяют массив $\hat{\mathbf{y}}_k^{кв} = \{\hat{y}_{k_i}^{кв}\}_{i=0}^{M}$;

в) вычисляются дисперсия $\sigma_{лм}^2$ и выборочное среднее $\mathrm{M}\{\hat{\mathbf{y}}_k^{лм}\}$ отсчётов массива $\hat{\mathbf{y}}_k^{лм}$. При вычислении используются следующие отсчёты:

$$\begin{cases} \{\hat{y}_{k_i}^{лм}\}_{i=0}^{0.5M-M_z-1} \cup \{\hat{y}_{k_i}^{лм}\}_{i=0.5M+M_z+1}^{M}, если\ k = 0,5M...N-1-0.5M; \\ \{\hat{y}_{k_i}^{лм}\}_{i=M_z+1}^{M}, если\ k < 0,5M; \\ \{\hat{y}_{k_i}^{лм}\}_{i=0}^{M-M_z-1}, если\ k > N-1-0,5M; \end{cases}$$

г) вычисляется дисперсия $\sigma_{кв}^2$ и выборочное среднее $\mathrm{M}\{\hat{\mathbf{y}}_k^{кв}\}$ отсчётов массива $\hat{\mathbf{y}}_k^{кв}$. При вычислении используются следующие отсчёты:

$$\begin{cases} \{\hat{y}_{k_i}^{кв}\}_{j=0}^{0,5M-M_z-1} \cup \{\hat{y}_{k_i}^{кв}\}_{j=0.5M+M_z+1}^{M}, если\ k = 0,5M...N-1-0,5M; \\ \{\hat{y}_{k_i}^{кв}\}_{i=M_z+1}^{M}, если\ k < 0,5M; \\ \{\hat{y}_{k_i}^{кв}\}_{i=0}^{M-M_z-1}, если\ k > N-1-0,5M. \end{cases}$$

После этого данные дисперсии сравниваются друг с другом. В случае если $\sigma_{лм}^2 > \sigma_{кв}^2$, дальнейшая обработка выполняется в блоке «Линейная модель», в противном случае – в блоке «Квадратичная модель».

После выбора модели тренда осуществляется вычисление нормированного отсчёта массива $\hat{\mathbf{y}}_k^{лм}$ или $\hat{\mathbf{y}}_k^{кв}$, который сравнивается с порогом обнаружения:

$$\hat{y}_k^{лм_norm} = \tag{11}$$
$$= \begin{cases} (\hat{\mathbf{y}}_{k_{0,5M}}^{лм} - \mathrm{M}\{\mathbf{y}_k^{лм}\})(\sigma_{лм}^2)^{-0.5}\ при\ k = 0,5M...N-1-0,5M; \\ (\hat{\mathbf{y}}_{k_0}^{лм} - \mathrm{M}\{\mathbf{y}_k^{лм}\})(\sigma_{лм}^2)^{-0.5}\ при\ k < 0,5M; \\ (\hat{\mathbf{y}}_{k_M}^{лм} - \mathrm{M}\{\mathbf{y}_k^{лм}\})(\sigma_{лм}^2)^{-0.5}, k > N-1-0,5M, \end{cases}$$

в случае $\sigma_{лм}^2 > \sigma_{кв}^2$,

$$\hat{y}_k^{кв_norm} = \tag{12}$$
$$= \begin{cases} (\hat{\mathbf{y}}_{k_{0,5M}}^{кв} - \mathrm{M}\{\hat{\mathbf{y}}_k^{кв}\})(\sigma_{кв}^2)^{-0.5}\ при\ k = 0,5M...N-1-0,5M; \\ (\hat{\mathbf{y}}_{k_0}^{кв} - \mathrm{M}\{\hat{\mathbf{y}}_k^{кв}\})(\sigma_{кв}^2)^{-0.5}\ при\ k < 0,5M; \\ (\hat{\mathbf{y}}_{k_M}^{кв} - \mathrm{M}\{\hat{\mathbf{y}}_k^{кв}\})(\sigma_{кв}^2)^{-0.5} k > N-1-0,5M, \end{cases}$$

в противном случае.

Определение аналитического выражения плотности распределения вероятностей нормированных случайных величин (11), (12) $\hat{y}_k^{лм_norm}$ и $\hat{y}_k^{кв_norm}$ является сложной задачей [15]. Для решения данной проблемы воспользуемся рядом Лагерра [16] для аппроксимации плотности распределения вероятностей случайных величин $\hat{\mathbf{y}}_k^{лм_norm}$ и $\hat{\mathbf{y}}_k^{кв_norm}$. Пороги обнаружения $\xi_{ЛМ}$ и $\xi_{КВ}$ вычисляются [17] путём интегрирования аппроксимации плотности распределения вероятностей случайных величин $\hat{\mathbf{y}}_k^{лм_norm}$ и $\hat{\mathbf{y}}_k^{кв_norm}$.

Порог обнаружения $\xi_{УС-СУЛТ}$ определяется выражением [8]: $\hat{\sigma}_ш^2 \cdot \ln\left(\frac{1}{F}\right)$, где $\hat{\sigma}_ш^2$ – оценка дисперсии шума; $\ln()$ – натуральный логарифм.

Исследование эффективности предлагаемого алгоритма стабилизации уровня ложных тревог

Эффективность алгоритма анализируется при помощи имитационного моделирования, а также на основе анализа экспериментальных данных.

Имитационное моделирование проведено при следующих параметрах системы обработки:

– $N = 256$;

– максимальный размер «скользящего» окна M = 128;

– вероятность ложной тревоги на канал обнаружения F = 10^{-7}, 10^{-8};

– значение критической статистики Манна-Уитни с уровнем значимости p = 0,05 ($z_{кр} = 1,96$);

– закон распределения отсчётов $\mathbf{y}_k$ в каналах обнаружения является экспоненциальным.

Для сравнения рассмотрен алгоритм стабилизации уровня ложной тревоги с усреднением, описанный в работе [18]:

$$y_k^{УС_ПУЛТ} > \hat{\sigma}_ш^2 \ln\left(\frac{1}{F_{зад}}\right). \tag{13}$$

На рисунках 4-6 показаны характеристики обнаружения предлагаемого алгоритма СУЛТ при разных значениях a, b, c. Вероятности ложной тревоги равны $F = 10^{-7}$ и $F = 10^{-8}$. Число опытов равно $10/F$.

На рисунках 4-6 сплошная линия соответствует характеристикам обнаружения предлагаемого алгоритма; пунктирная линия – алгоритму УС-СУЛТ (14).

Анализ зависимостей на рисунке 4 показывает, что при значении a = 0, b = 0, c = 0 (стационарный случай) эффективность предлагаемого алгоритма сопоставима с алгоритмом УС-СУЛТ (13), что объясняется наличием «Блока оценки стационарности».

Анализ зависимостей на рисунке 5 показывает, что при наличии нестационарности предлагаемый алгоритм обеспечивает выигрыш в пороговом отношении сигнал-шум 1,76 дБ при D = 0,9 и F = 10^{-7} по сравнению с алгоритмом (13). При D = 0,9 и F = 10^{-8} выигрыш составляет 1,82 дБ. Данный выигрыш объясняется тем, что изменение среднего значения шума в «скользящем» окне приведёт к увеличению порога обнаружения в алгоритме.

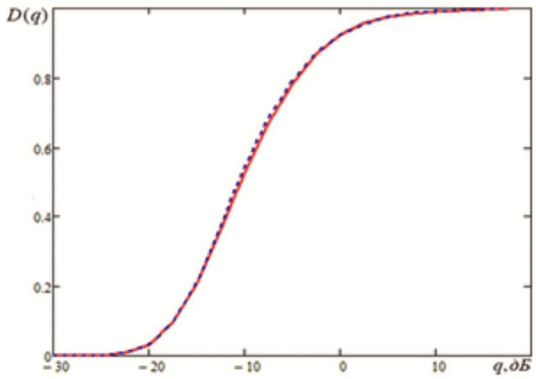
Анализ зависимостей на рисунках 5, 6 показывает, что при увеличении параметров a, b, c выигрыш в пороговом отношении сигнал-шум примерно составляет 5,71 дБ и 5,84 дБ в случае F = 10^{-7} и F = 10^{-8} соответственно.

В таблице приведён выигрыш в пороговом отношении сигнал-шум предлагаемого алгоритма по сравнению с алгоритмом (13) для различных параметров a, b, c в случаях F = 10^{-7}, F = 10^{-8} при вероятности правильного обнаружения D = 0,9.

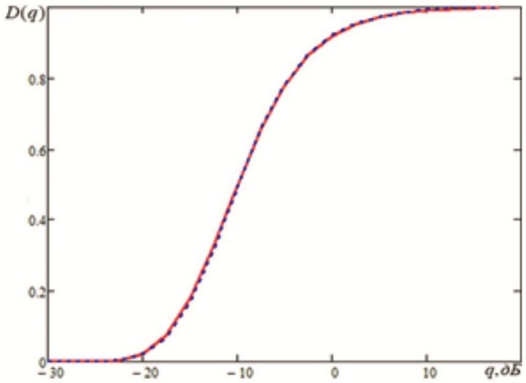
Анализ данных таблицы позволяет сделать вывод, что при значении a = b = c = 0 предлагаемый алгоритм сопоставим по эффективности с алгоритмом УС-СУЛТ на фоне стационарного шума. При отличии коэффициентов a,b,c от нуля, т.е. при наличии нестационарности шума, выигрыш в пороговом отношении сигнал-шум предлагаемого алгоритма увеличивается и составляет 7,75 дБ при значении a = 0,3, b = 5 и c = 8.

В работе также рассмотрен вопрос стабилизации уровня ложных тревог в предлагаемом алгоритме. Эффективность предлагаемого алгоритма определяется на основе анализа экспериментальных данных, полученных с помощью РЛС, имеющей следующие параметры:

– мощность излучения составляет 10 мВт;

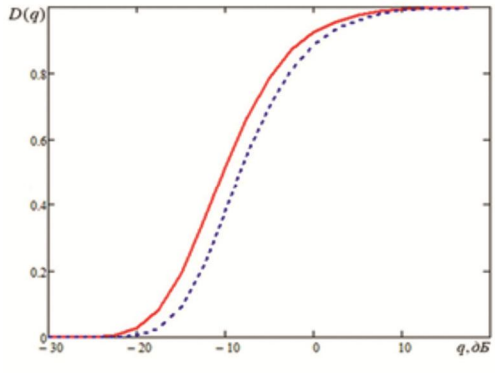


а)

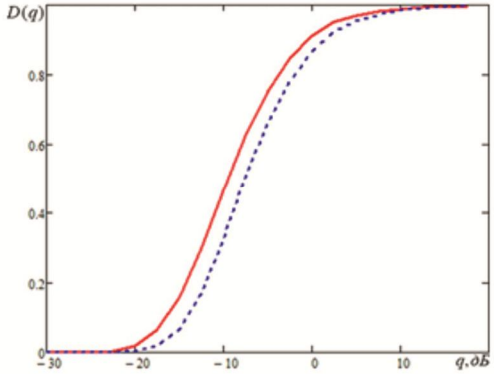


б)

Рисунок 4. Характеристики обнаружения предлагаемого алгоритма при значении a = 0, b = 0 и c = 0: а – $F = 10^{-7}$; б – $F = 10^{-8}$

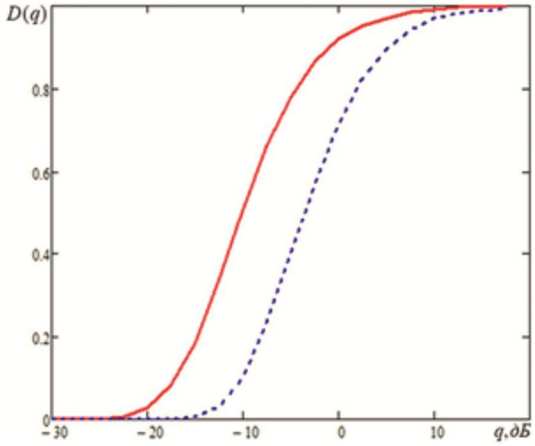


а)

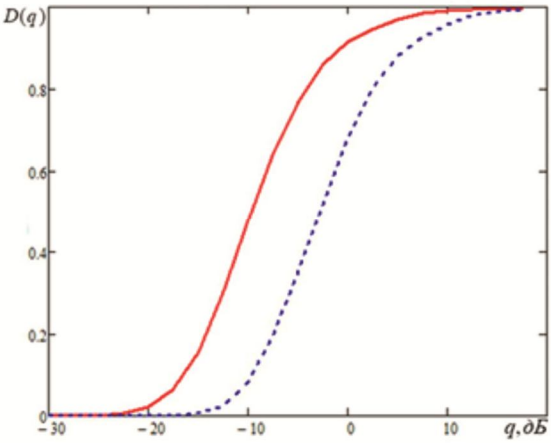


б)

Рисунок 5. Характеристики обнаружения предлагаемого алгоритма при значении a = 0, b = 3 и c = 5: а – $F = 10^{-7}$; б – $F = 10^{-8}$



а)



б)

Рисунок 6. Характеристики обнаружения предлагаемого алгоритма при значении a = 0,15, b = 2 и c = 3: а – $F = 10^{-7}$; б – $F = 10^{-8}$

Выигрыш в пороговом отношении сигнал-шум, дБ

Параметры			Заданная вероятность ложной тревоги, F	
a	b	c	F=10^{-7}	F=10^{-8}
0	0	0	0	0
0	2	3	2,34	2,56
0	4	5	3,15	3,27
0,1	2	1	4,08	4,19
0,2	1	2	5,97	6,15
0,3	5	8	7,58	7,75

– число каналов по дальности: 256;
– число зондирований: 255;
– высота установки антенны: 1,5 м;
– число сканирований сектора обзора: 10000.

Эксперименты проводились на территории ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В. Ф. Уткина».

На рисунке 7 представлены зависимости вероятности ложной тревоги $F(N)$ от номера k канала обнаружения при различных значениях размера «скользящего» окна M. Величина защитного интервала M_z = 2. Порог обнаружения вычислялся для значения вероятности ложной тревоги $F_{зад} = 10^{-3}$.

На рисунке 7 сплошная линия соответствует случаю M = 64; пунктирная – M = 32; штрихпунктирная – M = 16. Анализ зависимости показывает, что при увеличении объёма выборки M вероятность ложной тревоги F в ка-

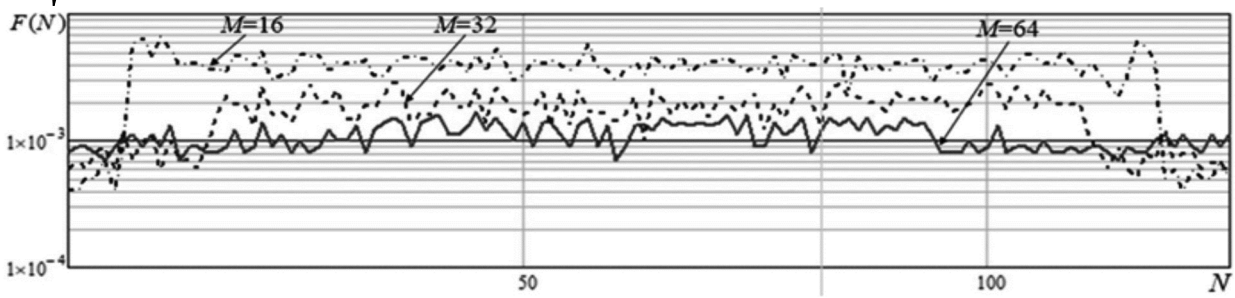


Рисунок 7. Зависимость вероятности ложной тревоги в каналах обнаружения при различном значении размера «скользящего» окна M

налах обнаружения стремится к заданной вероятности ложной тревоги $F_{зад}$.

Заключение

В работе представлен адаптивный алгоритм стабилизации уровня ложной тревоги на основе проверки стационарности шума в пределах «скользящего» окна. В основе алгоритма лежит проверка стационарности шума по критерию Манна – Уитни и дальнейший выбор соответствующей модели аппроксимации среднего значения шума в пределах «скользящего» окна. Результаты моделирования показывают, что на фоне шума с нестационарным средним значением шума предлагаемый алгоритм обеспечивает выигрыш в пороговом отношении сигнал-шум до 7,8 дБ по сравнению с известным алгоритмом УС-СУЛТ. Кроме того, эффективность предлагаемого алгоритма на фоне стационарного шума практически совпадает с эффективностью алгоритма УС-СУЛТ.

Литература

1. Finn, H.M., and Johnson, R.S. Adaptive detection mode with threshold control as a function of spatially sampled clutter estimates. RCA Rev., 1968, 29, (3), pp. 414-464.

2. M. Weiss. Analysis of some modified cell-averaging CFAR processors in multiple-target situations. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems 18 (1982), pp. 102-114.

3. P.P. Gandhi, S.A. Kassam. Analysis of CFAR processors in nonhomogeneous background. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems 24 (1988), pp. 427-444.

4. A. Farrouki and Barkat. Automatic censoring CFAR detector based on ordered data variability for nonhomogeneous environments. IEE Proceedings – Radar Sonar and Navigation., 2005, vol. 152, pp. 43-51.

5. B. Magaz, A. Belouchrani, M. Hamadouche. A New Adaptive Linear Combined Cfar Detector in Presence of Interfering Targets. Progress In Electromagnetics Research B., 2011, vol. 34, pp. 367-387.

6. Sung Won Hong and Dong Seog Han. Performance Analysis of an Environmental Adaptive CFAR Detector. Mathematical Problems in Engineering, 2014, pp. 1-7.

7. Amir Zaimbashi. An adaptive cell averaging-based CFAR detector for interfering targets and clutter-edge situations. Digital Signal Processing, 2014, pp. 59-68.

8. Бакулев П.А. Радиолокационные системы: учебник для вузов. М.: Радиотехника, 2004. 325 с.

9. Gandhi P.P., Kassam S.A. Optimality of the cell averaging CFAR detector. IEEE Trans. Inform. Theory, 1994, vol. 40, no. 4, pp. 1226-1228.

10. S.D. Himonas, M. Barkat. Automatic censored CFAR detection for nonhomogeneous environments. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems 28 (1992), pp. 286-304.

11. D.A. Shnidman. Radar Detection in Clutter. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems 41 (2005), pp. 1056-1067.

12. A. De Maio, A. Farina, G. Foglia. Design and experimental validation of knowledge-based CFAR detectors. IEEE Conference on Radar, 2006, pp. 1-8.

13. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. В трех книгах. Книга третья. М.: Сов. радио, 1976. 288 с.

14. Stepanov O.A. Fundamentals of estimation theory with applications to navigation information processing problems. SPb.: State Scientific Center of the Russian Federation JSC Concern Central Research Institute Elektropribor, 2010. 509 p.

15. Белокуров В.А., Нгуен Ч.К. Расчет плотности распреде-ления вероятностей оценок коэффициентов полинома в методе наименьших квадратов. Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2024. № 89. С. 12-20.

16. Alexits G. Convergence Problems of Orthogonal Series. Oxford: Pergamon, 1961. 350 p.

17. Белокуров В.А., Нгуен Ч.К. Алгоритм стабилизации уровня ложной тревоги на фоне шума с нестационарным средним значением. Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2025. № 1. С. 77-87.

18. Белокуров В.А., Нгуен Ч.К. Расчёт параметров схемы стабилизации вероятности ложной тревоги обнаружителя случайных сигналов. Цифровая обработка сигналов. 2023. № 2. С. 27-32.