

Радиолокационные системы

УДК 621.396.969

ОПТИМИЗАЦИЯ КАНАЛОВ УСКОРЕНИЯ МНОГОКАНАЛЬНОГО ОБНАРУЖИТЕЛЯ ПРИ ДЕЙСТВИИ КОРРЕЛИРОВАННОЙ ПОМЕХИ

Кошелев Виталий Иванович

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой радиотехнических систем.
ФГБОУ ВПО "Рязанский государственный радиотехнический университет"
E-mail: koshelev.v.i@rsreu.ru.

Козлов Дмитрий Николаевич

аспирант кафедры радиотехнических систем.
ФГБОУ ВПО "Рязанский государственный радиотехнический университет"
E-mail: kozlovdmn@gmail.com.
Адрес: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

Аннотация: В связи с бурным развитием теории и практики авиационной науки актуальной является рассмотренная в статье проблема обнаружения высокоманевренной цели на фоне коррелированной помехи. Для ее решения синтезирован алгоритм оптимизации каналов ускорения многоканального обнаружителя, позволяющий снизить потери в пороговом отношении сигнал-(помеха+шум) или понизить требования к вычислительным ресурсам. Эффект достигается за счет неравномерной расстановки каналов по априорно возможному диапазону межпериодных набегов фаз, вызванных ускорением. Приведены характеристики обнаружения алгоритмов с равномерной и оптимизированной расстановками каналов, рассчитанные с помощью метода характеристических функций. Полученный выигрыш в пороговом отношении сигнал-(помеха+шум) при обнаружении на фоне коррелированной гауссовской помехи составляет от 1 до 4 дБ. Проведено сравнение среднеквадратических отклонений оценок ускорения и быстродействия алгоритмов. Показана возможность повышения быстродействия алгоритма в 1,4 раза.

Ключевые слова: доплеровский обнаружитель, ускорение, оптимизация, коррелированная помеха, маневрирующая цель.

Введение

В настоящее время существует ряд алгоритмов обнаружения интенсивно маневрирующей цели, использующих для компенсации эффектов «размытия» спектра сигнала по каналам скорости, многоканальность по ускорению [1-3]. Однако введение дополнительной многоканальности по ускорению приводит к росту вычислительных затрат пропорциональных числу введенных каналов. Кроме того, увеличение числа каналов неоднозначно влияет на эффективность обнаружения, в связи с действием двух противоречивых факторов. Более точная настройка на неизвестный параметр (доплеровский набег фазы, обусловленный скоростью или ускорением) повы-

шает вероятность правильного обнаружения, а увеличение числа каналов обнаружения при сохранении вероятности ложной тревоги требует повышения порога обнаружения, что снижает вероятность правильного обнаружения.

Таким образом, имеются условия для решения оптимизационной задачи по определению количества и фазовой настройке каналов ускорения. Важным является также уменьшение количества операций, необходимых для реализации полученного в результате алгоритма обнаружения.

В работе [4] представлен алгоритм оптимизации каналов скорости на фоне коррелированных помех. Однако при синтезе данного

алгоритма не учитывался тот факт, что вероятность ложной тревоги зависит от числа каналов в системе обнаружения [5]. В настоящей работе предложенный в [4] алгоритм был модифицирован с учетом обеспечения вероятности ложных тревог в многоканальной системе обнаружения для оптимизации каналов ускорения.

Целью работы является синтез алгоритма, обеспечивающего оптимизацию параметров каналов ускорения многоканальной системы в условиях обнаружения на фоне коррелированной помехи по критерию максимума выигрыша в пороговом отношении сигнал-(помеха+шум). Другим возможным критерием оптимизации является минимизация вычислительных ресурсов при сохранении качества обнаружения.

Синтез алгоритма

Предполагаем, что излучаемый сигнал представляет собой пачку когерентных радиоимпульсов:

$$s(t) = \sum_{k=0}^{N-1} u(t - kT) \exp(i2\pi f_0 t),$$

где N – число импульсов в пачке, T – период повторения импульсов, i – мнимая единица, f_0 – несущая частота, $u(t)$ – передаваемый импульс.

В качестве модели движения цели примем равноускоренное движение. Состояние цели в дискретный момент времени k определяется вектором состояния $x_k = [r_k, \dot{r}_k, \ddot{r}_k]$, где r_k – дальность до цели, \dot{r}_k – скорость цели, \ddot{r}_k – ускорение цели. Таким образом, учитывая модель сигнала, получим:

$$x_{k+1} = \begin{bmatrix} 1 & T & \frac{T^2}{2} \\ 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} x_k.$$

Данная модель предполагает, что в течение накопления цель находится в одном элементе разрешения по дальности и скорости. Однако алгоритм может быть расширен и применен

для более реалистичных и сложных моделей движения.

Принимаемые данные разделим на полезную и мешающую компоненты, представляемые корреляционными матрицами сигнала \mathbf{R}_c и помехи \mathbf{R}_n . Для случая принятой модели движения элементы корреляционной матрицы сигнала \mathbf{R}_c могут быть представлены в виде:

$$r_{j,k}^c = \rho_{j,k}^c \exp \left[i(j-k)\varphi_c + \frac{i(j^2 - k^2)\varphi'_c}{2} \right], \quad (1)$$

где $\rho_{j,k}^c$ – коэффициент межпериодной корреляции, $j=0..N-1$, $k=0..N-1$, $\varphi_c = 2\pi \frac{2\dot{r}_k}{c} f_0 T$ – межпериодный набег фазы, обусловленный скоростью, $\varphi'_c = 2\pi \frac{2\ddot{r}_k}{c} f_0 T^2$ – межпериодный набег фазы, обусловленный ускорением, c – скорость света. Набеги фаз определяются несущей частотой сигнала, периодом повторения импульсов, скоростью и ускорением.

Оптимизируемая система обнаружения представляет собой многоканальную по дальности, скорости и ускорению систему. Так как каналы дальности не оптимизируются и не влияют на процесс оптимизации, то дальнейшие рассуждения приведем для одного из каналов дальности. В тоже время в расчетах учитывается вероятность ложной тревоги с учетом многоканальности по дальности.

Идея оптимизации каналов ускорения состоит в неравномерной их расстановке в зависимости от априорных данных об ускорении и помехе. Критерием являются потери в пороговом отношении сигнал-(помеха+шум) в сравнении со случаем точной настройки на неизвестный параметр.

Зависимость вероятности правильного обнаружения D от вероятности ложной тревоги F , отношения сигнал-(помеха+шум) (c -(п+ш)) на входе системы обработки q и коэффициента μ улучшения отношения c -(п+ш) может быть выражена [6]:

$$D = F^{1/(1+\mu q)}. \quad (2)$$

Логарифмируя выражение (2) и выполняя необходимые преобразования, пороговое от-

ношение с-(п+ш) (ПО) в m -м канале по ускорению и l -м канале по скорости может быть представлено:

$$\left\{ \left\{ q(\varphi_c, \varphi'_c) \right\}_{m=0}^{M-1} \right\}_{l=0}^{L-1} = \frac{d}{\mu_{m,l}(\varphi_c, \varphi'_c)}, \quad (3)$$

где $d = \frac{\ln(F/(LM))}{\ln(D)} - 1$, L и M – число каналов скорости и ускорения соответственно.

Предположим, что φ_c и φ'_c равномерно распределены в пределах канала. Максимальный коэффициент улучшения и соответствующий ему вектор обработки $\mathbf{W}_{m,l}$ в m -м канале ускорения и l -м канале скорости, оптимальный по критерию Неймана-Пирсона «в точке», могут быть найдены после усреднения по межпериодным набегам фаз в соответствующих каналах [7] из следующего выражения:

$$\left\{ \left\{ \mu \right\}_{m=0}^{M-1} \right\}_{l=0}^{L-1} = \max_{\mathbf{w}_{m,l}} \frac{1}{\Delta \psi'_m \Delta \psi_l} \times \int_{\psi'_m - \Delta \psi'_m / 2}^{\psi'_m + \Delta \psi'_m / 2} \int_{\psi_l - \Delta \psi_l / 2}^{\psi_l + \Delta \psi_l / 2} \frac{\mathbf{W}_{m,l}^H \mathbf{R}_c \mathbf{W}_{m,l}}{\mathbf{W}_{m,l}^H \mathbf{R}_n \mathbf{W}_{m,l}} d\varphi_c d\varphi'_c, \quad (4)$$

где $\Delta \psi'_m$ и $\Delta \psi_l$ – ширина m -го канала ускорения и ширина l -го канала скорости соответственно, ψ'_m и ψ_l – настройки m -го канала ускорения и l -го канала скорости соответственно, $\mathbf{W}_{m,l}$ – вектор с элементами $W_j^{m,l} = w_j^{m,l} \exp(i(j\psi_l + j^2\psi'_m/2))$, \mathbf{H} – оператор эрмитова сопряжения обозначает комплексное сопряжение и транспонирование.

Так как в выражении (4) от межпериодных набегов фаз φ_c и φ'_c зависят только элементы корреляционной матрицы сигнала (2), то после усреднения и применения формулы Эйлера они примут вид:

$$\left\{ \left\{ \bar{r}_{j,k}^c \right\}_{m=0}^{M-1} \right\}_{l=0}^{L-1} = \rho_{j,k}^c \times \exp[i(j-k)\psi_l + i(j^2 - k^2)\psi'_m/2] \text{sinc} \left[\frac{(j-k)\Delta\psi_l}{2} \right] \times \text{sinc} \left[\frac{(j^2 - k^2)\Delta\psi'_m}{4} \right]. \quad (5)$$

Таким образом, с учетом (5) после усреднения коэффициент улучшения отношения с-(п+ш) будет иметь вид:

$$\left\{ \left\{ \bar{\mu} \right\}_{m=0}^{M-1} \right\}_{l=0}^{L-1} = \max_{\mathbf{w}_{m,l}} \frac{\mathbf{w}_{m,l}^T \mathbf{r}_c \mathbf{w}_{m,l}}{\mathbf{w}_{m,l}^T \mathbf{r}_n \mathbf{w}_{m,l}}, \quad (6)$$

где $\mathbf{w}_{m,l}$ – вектор весовых коэффициентов с элементами $\{w_j^{m,l}\}_{j=0}^{N-1}$, \mathbf{r}_c и \mathbf{r}_n модифицированные корреляционные матрицы сигнала и помехи соответственно.

Элементы матрицы \mathbf{r}_c :

$$r_{j,k}^c = \rho_{j,k}^c \text{sinc}((j-k)\Delta\psi_l/2) \times \text{sinc}((j^2 - k^2)\Delta\psi'_m/4).$$

Элементы матрицы \mathbf{r}_n :

$$r_{j,k}^n = \rho_{j,k}^n \exp[-i((j-k)\psi_l + (j^2 - k^2)\psi'_m/2)].$$

Величина $\bar{\mu}$ равна максимальному собственному значению матрицы $\mathbf{r}_n^{-1} \mathbf{r}_c$, а соответствующий ему правый собственный вектор является вектором $\mathbf{w}_{m,l}$.

Потери в ПО определим как отношение ПО для случая текущей настройки каналов ускорения к минимально достижимому ПО q_{\min} , рассчитываемому для случая точной настройки каналов ускорения:

$$\Delta q = \frac{q}{q_{\min}}, \quad (7)$$

где $q_{\min} = \frac{d'}{\frac{1}{\Phi'_c} \sum_{l=0}^{L-1} \frac{1}{\Delta \psi_l} \int_{\psi'_c - \Delta \psi_l / 2}^{\psi'_c + \Delta \psi_l / 2} \int_{\psi'_c - \Delta \psi_l / 2}^{\psi'_c + \Delta \psi_l / 2} \mu_{m,l}(\varphi_c, \varphi'_c) d\varphi_c d\varphi'_c}$,

$d' = \frac{\ln(F/L)}{\ln(D)} - 1$, Φ'_c определяется диапазоном изменения межпериодного набега фаз, обусловленного ускорением.

На первом этапе алгоритма оптимизации с помощью (3), (6) и (7) вычисляются потери в ПО для случая, когда весь диапазон возможных сдвигов фаз за период, вызванных ускорением, обрабатывается одним каналом (рис. 1, этап 1). Если полученное значение оказывается больше допустимого $\Delta q_{\text{дон}}$, то диапазон сдвигов фаз, обрабатываемых каналом, уменьшается (рис. 1, этап 2), и процедура повторяется до

тех пор, пока потери в ПО не станут меньше или равными допустимому значению (рис. 1, этап 3). Далее вышеописанные процедуры повторяются для оставшегося диапазона сдвигов фаз (рис. 1, этап 4).

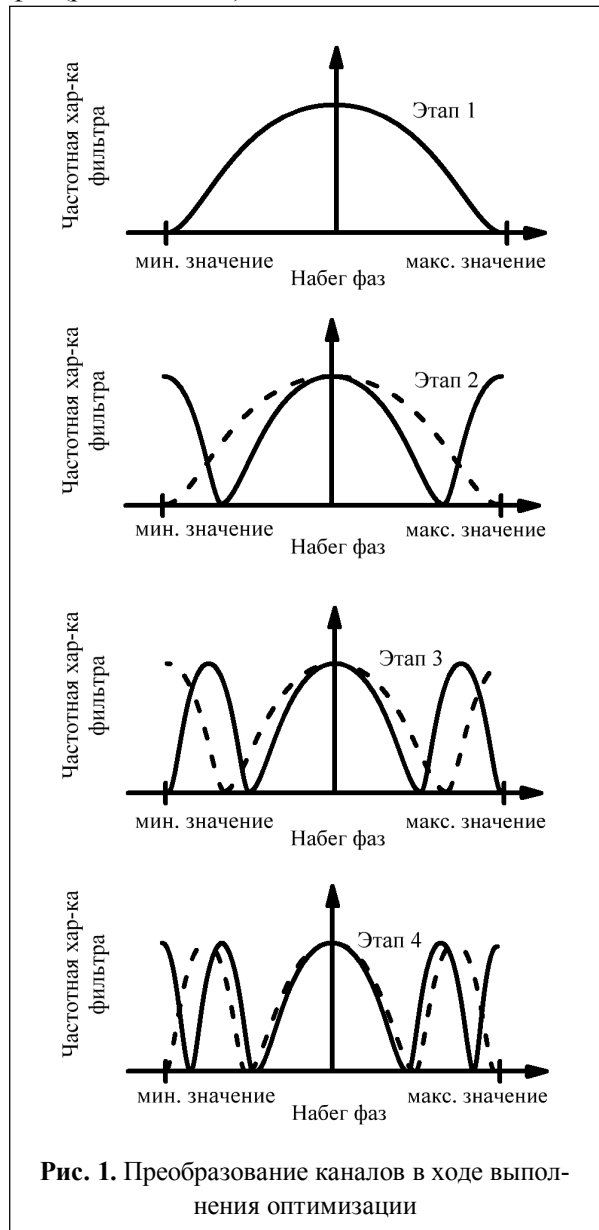


Рис. 1. Преобразование каналов в ходе выполнения оптимизации

При этом введение нового канала вызывает необходимость повторной оптимизации предыдущих каналов, так как изменяется величина порога для сохранения уровня ложных тревог на прежнем уровне. Это видно из зависимости параметра d от числа каналов. После применения алгоритма оптимизации получаем для каждого m -го канала ускорения векторы обработки W_m . Блок-схема алгоритма пред-

ставлена на рис. 2 (δ шаг изменения ширины канала).

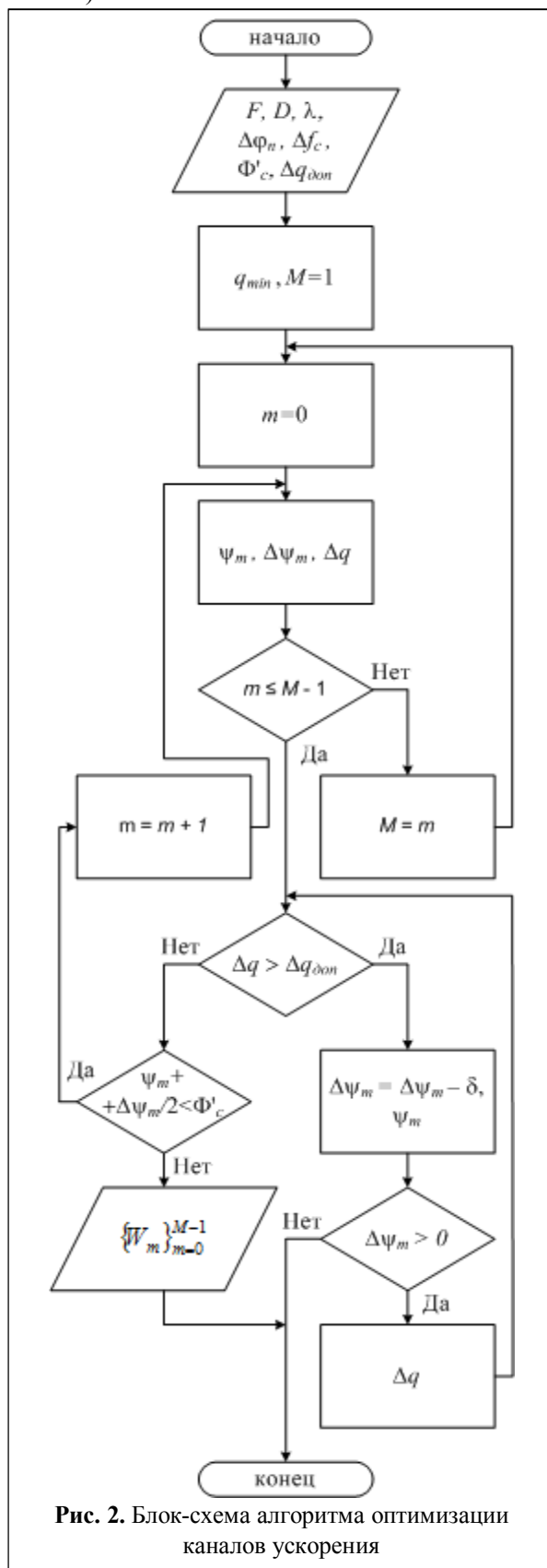


Рис. 2. Блок-схема алгоритма оптимизации каналов ускорения

Блоки действий осуществляют вычисления, описанные выше. Логические блоки (блоки проверки условий) выполняют следующие операции. Первый логический блок предназначен для запуска процедуры повторной оптимизации предыдущих каналов при добавлении нового. Второй логический блок проверяет условие допустимости потерь в ПО. Третий логический блок проверяет, охвачен ли каналами ускорения весь априорный диапазон изменения межпериодных набегов фаз. Четвертый логический блок предназначен для исключения вырожденного случая, когда ширина канала стремится к нулю.

Эффективность алгоритма

Сравнение алгоритмов обнаружения, использующих оптимизированные и неоптимизированные каналы, проведено по трем критериям: ПО с-(п+ш), среднеквадратическое отклонение (СКО) оценки ускорения и вычислительная эффективность.

Для сравнения по критерию ПО для приведенных ниже моделей воздействий и параметров с помощью метода характеристических функций [8] рассчитаны характеристики обнаружения, представленные на рис. 3 – 4.

Где сплошная линия – система с оптимизированными каналами ускорения, пунктирная линия – с неоптимизированными каналами ускорения.

Коэффициент межпериодной корреляции сигнала при аппроксимации спектра отражений резонансной кривой имеет вид:

$$\rho_{j,k} = \exp[-\pi \Delta f_c T |j - k|],$$

где Δf_c – ширина спектра флуктуаций сигнала [9]. В качестве мешающего сигнала использовалась модель помехи в виде аддитивной смеси некоррелированной и коррелированной по гауссовскому закону компонент. Элементы корреляционной матрицы мешающего сигнала в этом случае \mathbf{R}_n могут быть представлены в виде:

$$\rho_{j,k}^n = \frac{\left[\exp\left(\frac{-(\pi \Delta \varphi_n (j - k))^2}{2.8}\right) + \lambda \delta_{j,k} \right]}{1 + \lambda},$$

где $\Delta \varphi_n$ – нормированная к периоду повторения ширина спектра флуктуаций помехи, λ – отношение исходных компонент шума и помехи по мощности, $\delta_{j,k}$ – символ Кронекера. Вероятность ложной тревоги $F = 10^{-2}$, вероятность правильного обнаружения $D = 0,9$. Число импульсов в пачке $N = 32$, флуктуации внутри пачки дружные. Диапазон изменения набега фаз, обусловленного скоростью, равен 2π , диапазон изменения набега фаз, обусловленного ускорением, равен $0,05\pi$. Отношение исходных компонент по мощности $\lambda = 10^{-5}$. Из анализа характеристик обнаружения следует, что при $\Delta \varphi_n = 0,3$, $M = 7$ выигрыш в ПО системы с оптимизированными каналами ускорения по сравнению с системой с равномерной расстановкой каналов ускорения составляет 4 дБ, при $M = 5$ – 1 дБ. При $\Delta \varphi_n \leq 0,1$ оптимизация неэффективна, так как потери в ПО определяются в основном эффективностью подавления узкополосной помехи. При $\Delta \varphi_n \rightarrow 1$ (некоррелированная помеха) оптимизация в соответствии с известным алгоритмом обнаружения на фоне некоррелированного шума приводит к равномерной расстановке каналов ускорения.

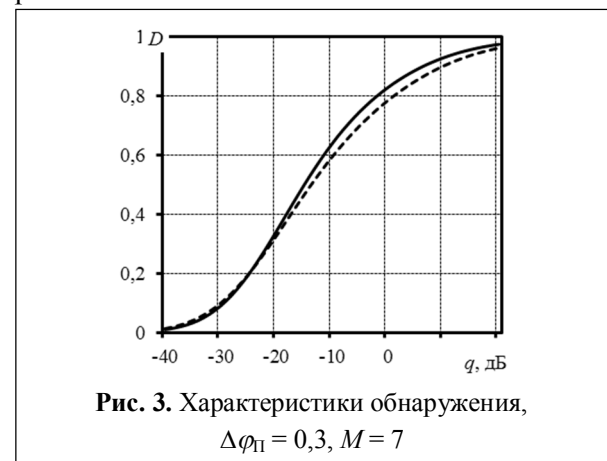
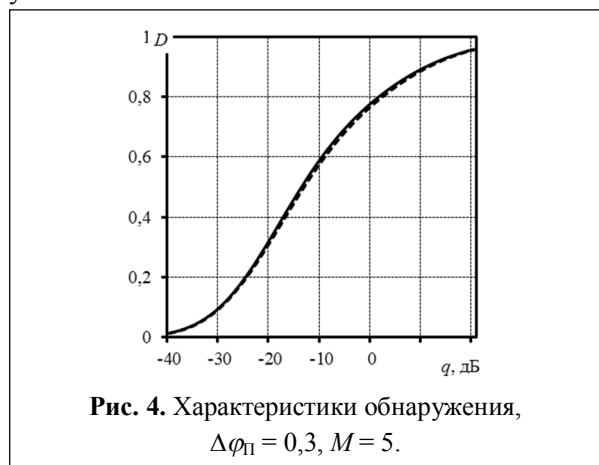


Рис. 3. Характеристики обнаружения, $\Delta \varphi_n = 0,3, M = 7$

На рис. 5 – 6 представлены СКО оценки ускорения, полученные методом имитационного моделирования (сплошная линия – система с оптимизированными каналами ускорения, пунктирная линия – с неоптимизированными каналами ускорения). Число опытов – 10^4 . Можно увидеть, что при использовании опти-

мизированных каналов, точность оценки уменьшается.



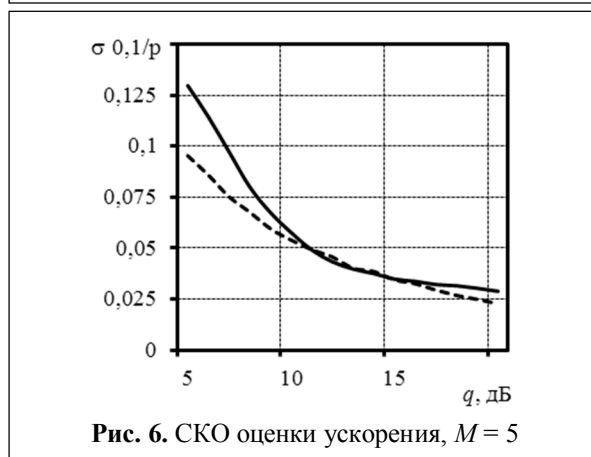
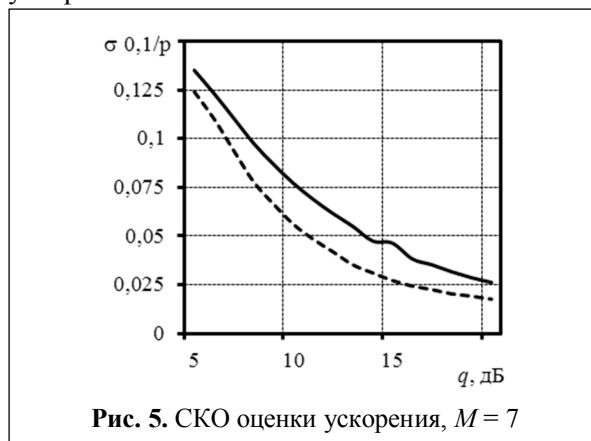
В качестве единицы измерения быстродействия алгоритмов использовалась элементарная операция (ЭО) типа умножения и сложения. На современном этапе развития цифровой техники можно считать, что эти действия выполняются за одинаковое время.

Для осуществления обработки сигнала в одном канале по ускорению требуется $6N$ ЭО на выполнение поворота фазы; $5N \log_2 N$ ЭО для вычисления N точечного БПФ; $3N$ ЭО для вычисления модулей БПФ. Для реализации данных действий во всех каналах ускорения требуется $M(6N + 5M \log_2 N + 3N)$ ЭО.

Сравнение вычислительной эффективности целесообразно проводить при условии одинаковой эффективности обнаружения, обеспечиваемой анализируемыми системами. Однако в силу неоднозначного влияния увеличения числа каналов на характеристики обнаружения [10] сравнение проводилось при максимально близких характеристиках обнаружения. При этом предлагаемый алгоритм позволяет уменьшить общее число каналов, за счет чего достигается выигрыш в количестве вычислительных операций в 1,4 раза.

Таким образом, была решена задача оптимизации каналов ускорения с целью повышения эффективности обнаружения и снижения вычислительных затрат, требуемых на реализацию, при заданных параметрах системы обнаружения. Результат достигается за счет неравномерной расстановки каналов с учетом необходимости коррекции порогов обнаруже-

ния, приводящей к снижению вероятности правильного обнаружения. Такое решение приводит к снижению точности оценки ускорения. Однако в условиях обнаружения на фоне коррелированных помех с нормированной к периоду повторения шириной спектра флюктуаций помехи больше 0,1 неравномерность расстановки каналов ускорения позволяет повысить вероятность правильного обнаружения при фиксированном отношении с-(п+ш). При близости характеристик обнаружения алгоритм с оптимизированными каналами ускорения требует меньшее количество вычислительных операций по сравнению с алгоритмом с равномерной расстановкой каналов ускорения.



Литература

1. Кузьменков В.Ю., Логинов В.М. Способы и устройства совместного измерения радиальной скорости и радиального ускорения // Радиотехника и электроника. 1997. – Т.42, – № 12. – С. 1465–1475.
2. Патент РФ № 2154837. Способ обнаружения линейно-частотно-модулированного сигнала с не-

известными параметрами / *А.Г. Аганин, А.В. Богданов, В.А. Голубенко, В.В. Киселев, В.Д. Лапердин, В.И. Меркулов, Ю.Л. Иванов, К.В. Рязанцев.*

3. Патент РФ № 2282873. Способ обнаружения сигналов, отраженных от маневрирующей цели и устройство для его реализации / *В.И. Кошелев, В.А. Белокуров.*

4. *Бакулев П.А., Кошелев В.И., Гладких В.В.* Оптимальное многоканальное обнаружение сигналов на фоне коррелированных помех // Изв. вузов. Радиоэлектроника.– 1987.– Т. 30.– №4.– С. 4-7.

5. *Кошелев В.И.* Параметры многоканального обнаружителя доплеровских сигналов. // Вестник Рязанской государственной радиотехнической академии. Выпуск 8.– Рязань, 2001.– С. 18-20.

6. *Бакулев П.А.* Радиолокационные системы. – М.: Радиотехника, 2007. – 376 с.

7. *Сосулин Ю.Г.* Теория обнаружения и оценивания стохастических сигналов. – М.: Советское радио, 1978. – 320 с.

8. *Миддлтон Д.* Введение в статистическую теорию связи.– М.: Сов. Радио, Том 2. 1962.– 653 с.

9. *Эдрингтон.* Статистические характеристики амплитуд радиолокационных сигналов, отраженных от самолетов // Зарубежная радиоэлектроника.– 1965.– № 9.– С. 41–51.

10. *Кошелев В.И., Белокуров В.А.* Выбор числа каналов обнаружителя маневрирующих целей // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. Выпуск 18.– Рязань, 2006.– С. 26–29.

Поступила 12 марта 2014 г.

English

Optimization of acceleration channels of a multi-channel detector under the action of correlated interference

Koshelev Vitaly Ivanovich – Doctor of Engineering, Professor, Department of Radio Engineering Systems of Ryazan State Radio Engineering University.

Kozlov Dmitry Nikolaevich – post-graduate student Department of Radio Engineering Systems of Ryazan State Radio Engineering University.

Address: 390005, Ryazan, Gagarina St., 59/1.

Abstract: The problem of detection of a highly maneuverable target with the correlated interference background is a current problem in theory and practice of aeronautics. An algorithm of optimization of acceleration channels of a multi-channel detector which allows to reduce losses in a threshold ratio a signal - (interference+noise) or to diminish the requirements to computing resources has been developed with the purpose of solving the said problem. The effect is gained due to irregular arrangement of channels in a priori possible range of enterperiodic phase incursions caused by speedup. The performances of detecting algorithms with the uniform and optimized channel arrangements, calculated with the help of characteristic functions method are given. The gained improvement in a threshold ratio signal - (interference+noise) at the detection on the correlative Gaussian interference background is from 1 to 4 dBs. Comparison of mean square deviations of speedup estimations and high-speed performance of algorithms have been made. The possible increase of high-speed performance of an algorithm is 1.4 times.

Key words: Doppler detector, speedup, optimization, correlative interference, maneuvering target.

References

1. *Kuzmenkov V.Ju., Loginov V.M.* Methods and Devices of Combined Change of Radial Velocity and Acceleration. Radiotekhnika i jelektronika. 1997. Vol.42, № 12. P. 1465–1475.

2. Russian Federation Patent № 2154837. Detection Method of Linear-Frequency-Modulated Signal with Unknown Parameters. *A.G. Aganin, A.V. Bogdanov, V.A. Golubenko, V.V. Kiselev, V.D. Laperdin, V.I. Merkulov, Ju.L. Ivanov, K.V. Rjazancev.*

3. Russian Federation Patent № 2282873. Detection Method of Signals Reflected by a Maneuvering Target and Device for its Implementation. *V.I. Koshelev, V.A. Belokurov.*

4. *Bakulev P.A., Koshelev V.I., Gladkih V.V.* Optimal Multichannel Signal Detection with the Background Correlated Jams. Izv. vuzov. Radiojelektronika. 1987. Vol. 30. № 4. P. 4-7.

5. *Koshelev V.I.* Parameters of Multichannel Detection of Doppler Signals. Vestnik Rjazanskoj gosudarstvennoj radiotekhnicheskoy akademii. Vypusk 8. Rjazan, 2001. P. 18-20.

6. *Middlton D.* Introduction into Strategic Theory of Communication. M.: Sovetskoe Radio, Vol 2. 1962. 653 p.

7. *Edrington.* Statistic Performances of Radio Location Signals Reflected by Aircrafts. Zarubezhnaja radiojelektronika. 1965. № 9.–P. 41–51.

8. *Koshelev V.I., Belokurov V.A.* Channel Number Selection of Maneuvering Targets. Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta. Vypusk 18. Rjazan, 2006. P. 26–29.