

АЛГОРИТМ ОПТИМАЛЬНОГО ОБНАРУЖЕНИЯ ДВИЖУЩЕЙСЯ ЦЕЛИ БОРТОВОЙ РЛС

В. Л. Румянцев^{1*}, И. А. Ростовцев², А. Н. Карпов², Д. В. Титов³¹ Центральное конструкторское бюро приборостроения, Тула, Россия² Филиал Военной академии материально-технического обеспечения, Пенза, Россия³ Юго-Западный государственный университет, Курск, Россия

* vlroom@yandex.ru

Аннотация. Приведены результаты синтеза алгоритма оптимального обнаружения сигналов, заключающегося в знакопеременном преобразовании принимаемых сигналов во времени и компенсации помехового сигнала при накоплении в фильтре. Физической основой синтеза алгоритма являются различия между частотно-временными характеристиками сигналов, отраженных от движущейся цели и земной поверхности, проявляющиеся во временном сдвиге максимумов полезного и помехового сигналов с равными доплеровскими сдвигами частоты. В алгоритме обработки выполняется сравнение модуля весового интеграла с порогом. Разработана структурная схема оптимального обнаружителя. Рассмотрена зависимость нормированного по амплитуде весового вектора оптимальной обработки от времени. Проведена оценка потенциальных характеристик обнаружения движущихся целей. Показано, что при обнаружении малоскоростных целей существуют оптимальные скорости сканирования, при которых вероятность правильного обнаружения максимальна.

Ключевые слова: алгоритм обнаружения, помеховый сигнал, весовая обработка, доплеровская частота, вероятность обнаружения

Ссылка для цитирования: Румянцев В. Л., Ростовцев И. А., Карпов А. Н., Титов Д. В. Алгоритм оптимального обнаружения движущейся цели бортовой РЛС // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 6. С. 492–499. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-6-492-499.

AN ALGORITHM FOR OPTIMAL DETECTION OF A MOVING TARGET BY AN ON-BOARD RADAR

V. L. Rumyantsev^{1*}, I. A. Rostovtsev², A. N. Karpov², D. V. Titov³¹ Central Design Bureau of Apparatus Engineering, Tula, Russia² Military Academy of Logistics, Penza Branch, Penza, Penza, Russia³ Southwest State University, Kursk, Russia

* vlroom@yandex.ru

Abstract. Results of the synthesis of an algorithm for optimal signal detection, which consists in alternating sign conversion of received signals in time and compensation of the interference signal during accumulation in the filter, are presented. The physical basis of the algorithm synthesis is the differences between the time-frequency characteristics of the signals reflected from a moving target and the earth's surface, manifested in the time shift of the maximums of the useful and interference signals with equal Doppler frequency shifts. The processing algorithm compares the modulus of the weight integral with the threshold. A block diagram of an optimal detector is developed. The dependence of the weight vector of optimal processing normalized by amplitude on time is considered. The potential performance of moving target detection is assessed. It is shown that when detecting low-speed targets, there are optimal scanning speeds at which the probability of correct detection is maximum.

Keywords: detection algorithm, interference signal, weight processing, Doppler frequency, detection probability

For citation: Rumyantsev V. L., Rostovtsev I. A., Karpov A. N., Titov D. V. An algorithm for optimal detection of a moving target by an on-board radar. *Journal of Instrument Engineering*. 2024. Vol. 67, N 6. P. 492–499 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-6-492-499.

Для решения задач углового сопровождения цели антенны современных РЛС имеют суммарно-разностную диаграмму направленности (ДН) которая может быть использована также для пространственной обработки сигналов, что позволит повысить эффективность обнаружения воздушных и наземных целей на фоне местности [1–6]. Поэтому целесообразно синтезировать

алгоритм оптимальной обработки сигналов, принятых суммарной и разностной ДН антенны в режимах обзора и сопровождения, т.е. синтез при частично заданной структуре РЛС.

Сигнал, отраженный от земной поверхности, на выходе однолучевой антенны, сканирующей по азимуту, в когерентно-импульсной РЛС представляет собой сумму случайных амплитудно-модулированных сигналов, сдвинутых друг относительно друга по времени и доплеровской частоте. Сигнал, отраженный от движущейся цели (ДЦ), образуется отражениями от элементарного точечного отражателя земной поверхности в зависимости от движения летательного аппарата и эффективной поверхности рассеяния (ЭПР) цели.

Анализ сигналов, отраженных от ДЦ и земной поверхности, показывает наличие частотно-временных различий между ними, проявляющихся во временном сдвиге максимумов полезного и помехового сигналов с равными доплеровскими сдвигами частоты. При увеличении радиальной скорости цели этот временной сдвиг увеличивается.

Задача синтеза алгоритма оптимального обнаружителя ставится следующим образом. Пусть на вход некоторого обнаружителя поступает аддитивная смесь $Y(t)$ полезного сигнала $U_{ц}(t)$, помехового сигнала $U_{п}(t)$, отраженного от земной поверхности, и внутреннего шума приемника $n(t)$.

Для радиолокационных устройств шум $n(t)$ можно принять белым гауссовым со спектральной плотностью мощности $N_0/2$ [4–6]:

$$Y(t) = U_{ц}(t) + U_{п}(t) + n(t). \quad (1)$$

Необходимо синтезировать алгоритм оптимального обнаружения сигналов, максимизирующий вероятность правильного обнаружения цели при заданной вероятности ложной тревоги $P_{лт}$.

Согласно теории статистических решений, алгоритм обработки заключается в сравнении логарифма отношения функционалов правдоподобия с порогом и при гауссовой статистике помех он может быть сведен к сравнению модуля весового интеграла $|Z|$ с порогом Z_0 [5, 6]:

$$|Z| = \int_0^{T_n} Y(t)R(t)dt \begin{cases} \geq & \text{да} \\ & Z_0. \\ < & \text{нет} \end{cases} \quad (2)$$

Порог обнаружения Z_0 выбирается из соотношения [4–6] $Z_0 = \sqrt{2D_{п} \ln(1/P_{лт})}$, где $D_{п}$ — дисперсия флуктуаций величины Z при отсутствии в смеси реализации полезного сигнала.

Весовой вектор оптимальной обработки $R(t)$ должен удовлетворять уравнению Фредгольма 2-го рода [7, 8]:

$$\int_0^{T_n} K(s, t)R(s)ds = U_{ц}(t), \quad (3)$$

где $K(s, t) = K_{п}(s, t) + \frac{N_0}{2}\delta(t - s)$; $R(s)$ соответствует $R(t)$ при замене символа t на s .

В общем случае решение интегрального уравнения в конечных пределах затруднительно. Однако для случая разложимых ядер решение (2) известно и имеет вид [9, 10]:

$$R(t) = \frac{2}{N_0} \exp\{j2\pi f_{дц} t\} \left(\exp\left\{-\frac{\pi}{T^2}(t - t_{ц})^2\right\} - \sum_{k=1}^{N_{и}} \sum_{i=1}^{\infty} D_{iK} S_{iK} \exp\left\{-(t - t_{iK})^2\right\} \exp\{j2\pi(f_{ди} - f_{дц})t\} \right), \quad (4)$$

где $t_{ц}$ — время задержки сигнала, отраженного от цели; S_{iK} — весовые множители, определяемые из системы линейных алгебраических уравнений [11–15]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{k=1}^{N_n} \sum_{i=1}^{\infty} S_{iK} \int_0^{T_n} A_{iK}(t) K_{11}(t) dt + \frac{N_0}{2} S_{11} = \int_0^{T_n} U'_{\text{ц}}(t) K_{11}(t) dt; \\ \sum_{k=1}^{N_n} \sum_{i=1}^{\infty} S_{iK} \int_0^{T_n} A_{iK}(t) K_{21}(t) dt + \frac{N_0}{2} S_{21} = \int_0^{T_n} U'_{\text{ц}}(t) K_{21}(t) dt; \\ \vdots \\ \sum_{k=1}^{N_n} \sum_{i=1}^{\infty} S_{iK} \int_0^{T_n} A_{iK}(t) K_{\infty N_n}(t) dt + \frac{N_0}{2} S_{\infty N_n} = \int_0^{T_n} U'_{\text{ц}}(t) K_{\infty N_n}(t) dt, \end{array} \right. \quad (5)$$

$$K_{iK} = \int_0^{T_n} \exp \left\{ -\frac{\pi}{T^2} (t - t_{iK})^2 \exp \{ -j2\pi f_{\text{д}i} t \} \right\}; \quad (6)$$

$$A_{iK} = P_{iK} \int_0^{T_n} \exp \left\{ -\frac{\pi}{T^2} (t - t_{iK})^2 \exp \{ -j2\pi f_{\text{д}i} t \} \right\};$$

где N_n — число импульсов; A — амплитуда; $f_{\text{дц}}$ — приращение доплеровской частоты сигнала цели, обусловленное взаимным перемещением цели и носителя РЛС; где D_{iK} — дисперсия флуктуаций амплитуды сигнала, отраженного от i -го отражателя земной поверхности, на K -й составляющей помехового сигнала, кратной частоте повторения импульсов; t_{iK} — временное положение максимума сигнала, отраженного от i -й точки земной поверхности; $T = \theta_0/\Omega_{\text{ск}}$ — эффективная длительность отраженного сигнала, $\Omega_{\text{ск}}$ — частота сканирования диаграммы направленности антенны.

Подставив (3) в (1), получим [9, 13]:

$$\begin{aligned} |Z| = \frac{2}{N_0} \left| \int_0^{T_n} Y(t) \exp \{ -j2\pi f_{\text{дц}} t \} \left(\exp \left\{ -\frac{\pi}{T^2} (t - t_{\text{ц}})^2 \right\} - \right. \right. \\ \left. \left. - \sum_{k=1}^{N_n} \sum_{i=1}^{\infty} Y(t) D_{iK} S_{iK} \exp \left\{ -\frac{\pi}{T^2} (t - t_{iK})^2 \right\} \exp \{ j2\pi (f_{\text{дц}} - f_{\text{д}i}) t \} \right) dt \right| \begin{array}{l} \geq \\ < \end{array} Z_0. \end{aligned} \quad (7)$$

нет

Структурная схема оптимального обнаружителя представлена на рис. 1.

Весовой вектор $R_0(t)$ определяется из условия расположения максимума сигнала цели в центре интервала, равного времени наблюдения, для каждого доплеровского фильтра с центральной частотой настройки $f_{\text{ф}} = f_{\text{дц}}$. Этим обеспечивается максимальное использование энергии сигнала цели. Вследствие того, что в режиме обзора азимут цели неизвестен, положение полезного сигнала во времени имеет случайный характер.

Для пояснения принципа работы устройства весовой обработки (УВО) рассмотрим зависимости нормированного по амплитуде весового вектора оптимальной обработки $R_0(t)$ во времени t , приведенные на рис. 2 (U_3 — сигнал, отраженный от земной поверхности; N — число элементарных отражателей).

Графики построены для различных радиальных составляющих скорости цели и разного числа элементарных отражателей земной поверхности N , размещаемых равномерно по три отражателя на полосу пропускания каждого фильтра в пределах не менее пяти эффективных размеров ДН антенны по азимуту.

При радиальной скорости цели $V_{\text{ц}} = 0$ максимумы сигналов цели и помехи совпадают (см. рис. 2). Поэтому возможность обнаружения цели определяется разностью амплитудного контраста полезного сигнала и помеховых отражений. При увеличении $V_{\text{ц}}$ максимум сигнала цели смещается во времени относительно t_3 , поэтому после домножения на весовые коэффи-

циенты увеличивается асимметрия положительной и отрицательной областей преобразованного сигнала цели, что приводит к возрастанию сигнала цели на выходе фильтра. Следовательно, при возрастании $V_{ц}$ отношение „сигнал/помеха“ на выходе системы обработки увеличивается.

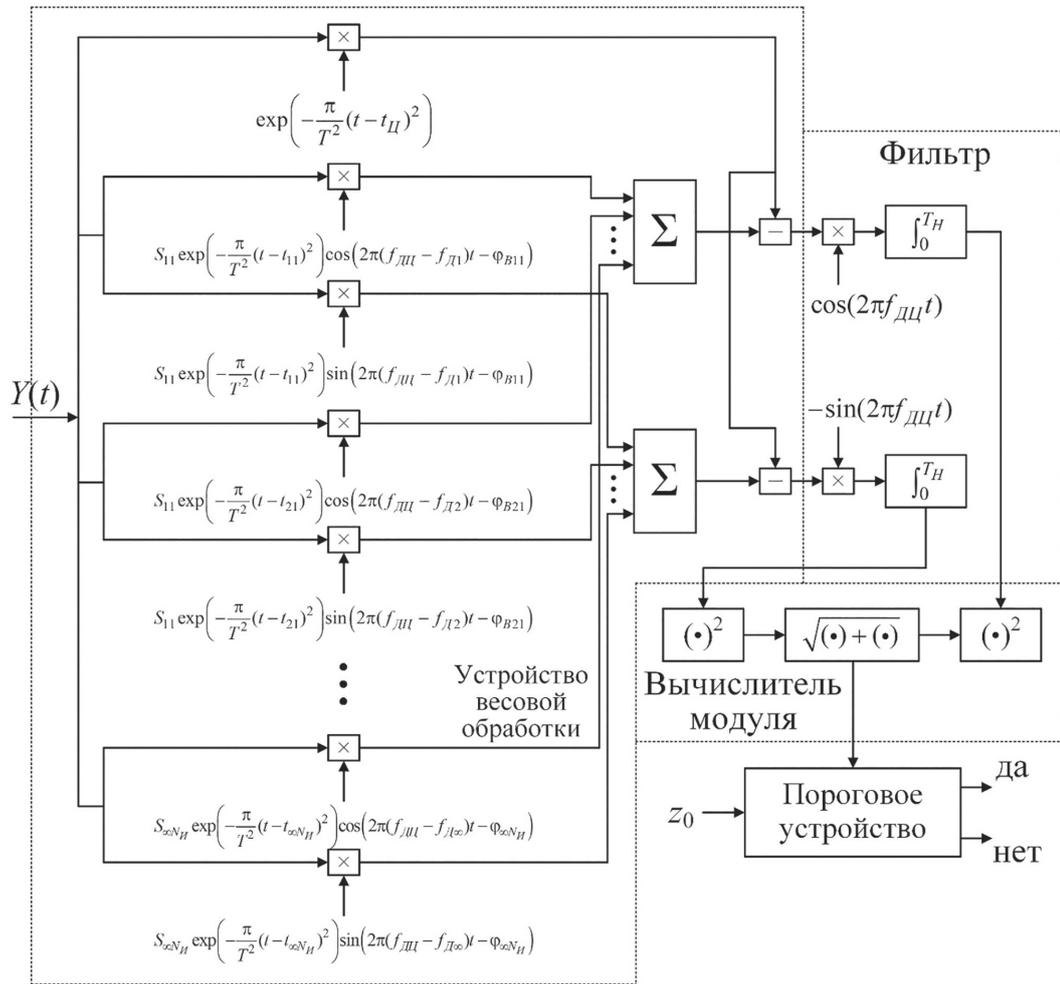


Рис. 1

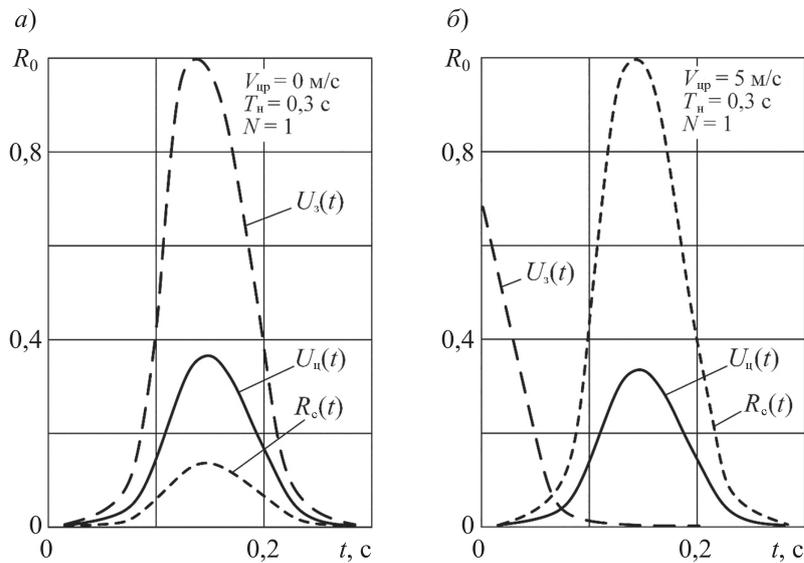


Рис. 2

При $V_{ц} \geq 8-10$ м/с максимумы полезного и помехового сигналов будут разнесены на величину, большую эффективной длительности отраженного сигнала T , и окажут незначительное влияние друг на друга. Обработка становится согласованной со структурой сигнала, отраженного от цели.

Для расчета весового вектора $R_0(t)$ согласно (3) необходимо решить систему бесконечного числа уравнений и найти S_i , что требует огромных вычислительных затрат и определяет невозможность практической реализации. Физически это означает учет в $R_0(t)$ влияния всех отражателей земной поверхности, разнесенных по азимуту. Однако известно [5, 6], что наибольшее влияние на характеристики обнаружения оказывает составляющая помехового сигнала, отраженная от точки земной поверхности, имеющая тот же доплеровский сдвиг частоты, что и у сигнала цели. Это объясняется наибольшей корреляцией сигнала ДЦ с данной составляющей помехового сигнала.

Следовательно, если настроить $R_0(t)$ на подавление лишь составляющей помехового сигнала, отраженного от отражателя земной поверхности, с той же частотой, что и у сигнала цели, то выражение (3) существенно упростится и не будет представлять больших вычислительных сложностей. Квазиоптимальный обнаружитель с весовым вектором, обеспечивающим подавление лишь одной составляющей помехового сигнала, будет являться одноточечным компенсатором помех.

Для расчета потенциальных характеристик обнаружения воспользуемся методикой, изложенной в [2, 4]. В соответствии с ней параметр обнаружения Q оптимального алгоритма (7) имеет вид:

$$Q = D_{ц} \int_0^{T_n} U_{ц}(t) R^*(t) dt = \frac{2D_{ц}}{N_0} \left(\int_0^{T_n} \exp \left\{ -2 \frac{\pi}{T^2} (t - t_{ц})^2 \right\} dt - \sum_{k=1}^{N_{и}} \sum_{i=1}^{\infty} Y(t) D_{iK} S_{iK} \int_0^{T_n} \exp \left\{ -\frac{\pi}{T^2} ((t - t_{ц})^2) \right\} \exp \{ j2\pi (f_{дц} - f_{ди}) t \} dt \right) \tag{8}$$

Вероятность правильного обнаружения $P_{по}$ связана с Q зависимостью:

$$P_{по} = \frac{1}{P_{лт}^{1+Q/2}}, \tag{9}$$

где $P_{лт}$ — условная вероятность ложной тревоги.

Будем считать цель обнаруженной, если при $P_{лт} = 10^{-6}$ вероятность правильного обнаружения составит $P_{по} = 0,5$ [2, 5].

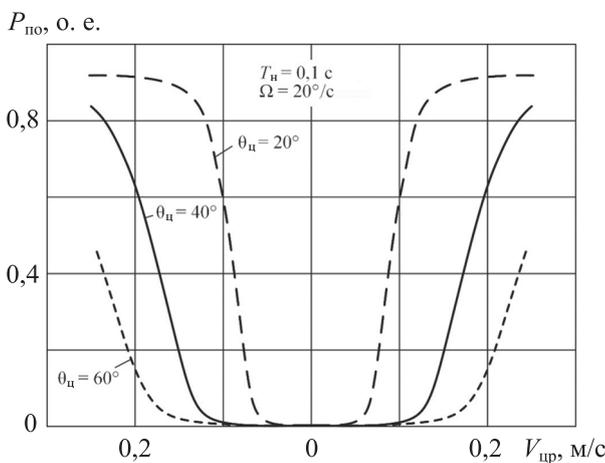


Рис. 3

Потенциальные характеристики обнаружения рассчитывались по соотношениям (8) и (9). В качестве исходных данных использовались характеристики РЛС, обеспечивающие отношение „сигнал/шум“ 25 дБ и „помеха/шум“ в элементе разрешения — 35 дБ, действующее на входе системы обработки. Принималось: $\theta_0 = 2^\circ$, $P_{лт} = 10^{-6}$. Интервал $[0, T_n]$ располагался симметрично относительно максимума сигнала цели.

На рис. 3 представлены зависимости вероятности правильного обнаружения $P_{по}$ от радиальной составляющей скорости цели $V_{ц}$ при различных $\theta_{ц}$. При $V_{ц} = 0$ практически нулевое значение $P_{по}$ объясняется подавлением слабого сигнала цели мощным помеховым сигналом на той же частоте ($f_{ди} = f_{дц}$).

При увеличении сигнал цели сдвигается относительно помехового сигнала по времени. Дальнейшее увеличение $V_{ц}$ приводит к незначительному изменению $P_{по}$, поскольку сигналы помехи и цели уже разнесены по времени и частоте, и обнаружение сигнала цели происходит практически на фоне внутренних шумов приемника.

Увеличение интервала наблюдения сопровождается ростом энергии сигнала цели и сужением полосы пропускания фильтра, а следовательно, улучшением характеристик обнаружения. Так, увеличение времени накопления с 0,1 до 0,5 с приводит к снижению $V_{цmin}$ ($P_{по} = 0,5$; $P_{лт} = 10^{-6}$) с 1,9 до 1,8 м/с.

Анализ зависимостей $P_{по}$ от угловой скорости сканирования ДНА по азимуту (рис. 3) показывает, что при обнаружении малоскоростных движущихся целей существуют оптимальные значения скорости сканирования, при которых $P_{по}$ максимальна. Это связано с тем, что при уменьшении $\Omega_{ск}$ возрастает эффективная длительность пачки отраженных импульсов T , поэтому при фиксированном значении $T_{н}$ частотно-временные различия практически пропадают. При увеличении $\Omega_{ск}$ длительность пачки импульсов, а следовательно, и энергия полезного сигнала уменьшаются.

Максимум $P_{по}$ с ошибкой не более 10 % при заданном $T_{н}$ наблюдается при согласованности T и $T_{н}$ ($T \approx T_{н}$). Следовательно, оптимальной для заданного $T_{н}$ является скорость сканирования ДН антенны $\Omega_{опт}$, при которой длительность пачки сигналов, отраженных от цели, согласована со временем наблюдения.

С использованием выражений (7) и (8) построены зависимости минимальной радиальной составляющей скорости обнаруживаемой цели $V_{цmin}$ от азимута цели $\theta_{ц}$ при различных $T_{н}$ (рис. 4). Из графиков следует, что при увеличении азимута цели с $\theta_{ц} = 20$ до 60° значение $V_{цmin}$ возрастает на 3–5,5 м/с.

На дальностях $D_{ц} = 75–90$ км обеспечивается обнаружение целей при $V_{рц} = 1,5$ м/с на фоне подстилающей поверхности типа „луг, лето“ с $P_{по} = 0,5–0,7$ при $\theta_{ц} = 30^\circ$ и $T_{н} = 0,1$ с.

Проведенные исследования показали, что оптимальный обнаружитель ДЦ с частотно-временным разделением полезных и помеховых сигналов обеспечивает обнаружение ДЦ, движущихся с радиальными составляющими скоростей сближения 1,5 м/с и более.

Выводы

1. Синтезирован оптимальный алгоритм обнаружения ДЦ с частотно-временным разделением полезных и помеховых сигналов, который заключается в знакопеременном преобразовании принимаемых сигналов во времени и компенсации помехового сигнала при накоплении в фильтре.

2. Оценено влияние радиальной скорости на возможность обнаружения цели. Показано, что возможность обнаружения неподвижной цели определяется разностью полезного сигнала и отражений от подстилающей поверхности. С увеличением скорости обработка становится согласованной с сигналом, отраженным от цели.

3. Проведена оценка зависимостей $P_{по}$ от угловой скорости сканирования ДН антенны. Установлено, что при обнаружении малоскоростных движущихся целей существуют оптимальные скорости сканирования, при которых значение $P_{по}$ максимально.

4. Показано, что оптимальный обнаружитель ДЦ с частотно-временным разделением полезных и помеховых сигналов обеспечивает обнаружение ДЦ, движущихся с радиальными составляющими скоростей сближения 1,5 м/с и более.

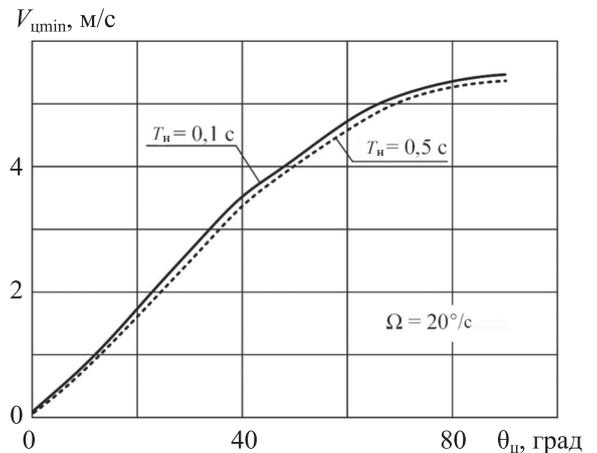


Рис. 4

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Верба В. С., Неронский Л. Б., Осипов И. Г., Турук В. Э. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования. М.: Радиотехника, 2010. 680 с.
2. Дулевич В. Е. Теоретические основы радиолокации. М.: Сов. радио, 1978.
3. Школьный Л. А. Радиолокационные системы воздушной разведки, дешифрование радиолокационных изображений. М.: Изд-во ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, 2008. 531 с.
4. Бакулев П. А., Степин В. М. Методы и устройства селекции движущихся целей. М.: Радио и связь, 1986. 288 с.
5. Справочник по радиолокации / Пер. с англ.; под общей ред. К. Н. Трофимова. М.: Сов. радио, 1978.
6. Обработка сигналов в многоканальных РЛС / Под ред. А. П. Лукошкина. М.: Радио и связь, 1983. 328 с.
7. Крамер Г. Математические методы статистики / Пер. с англ.; под ред. А. Н. Колмогорова. М.: Мир, 1975. 648 с.
8. Вентцель Е. С. Теория вероятностей и ее инженерные приложения. М.: Наука, 1988. 560 с.
9. Акиншин Н. С., Петешов А. В., Румянцев В. Л., Хомяков К. А. Адаптивные алгоритмы оптимальной фильтрации сигнала // Изв. ТулГУ. Сер. Технические науки. 2018. Вып. 9. С. 69–79.
10. Кошелев В. И., Белокуров В. А. Адаптивное обнаружение маневрирующих целей // Цифровая обработка сигналов. 2005. № 1. С. 41–46.
11. Страхова Л. А. Обнаружение сигнала движущейся цели на фоне пассивных помех с применением спектрального анализа // Изв. вузов. Радиоэлектроника. 1988. № 4. С. 8–15.
12. Быстров Р. П., Дмитриев В. Г., Потапов А. А., Соколов А. В. Проблемы радиолокационного обнаружения малоконтрастных объектов. Вопросы перспективной радиолокации. М.: Радиотехника, 2003. С. 20–48.
13. Зиатдинов С. И. Синтез дискретных фильтров методами инвариантных дифференциальных и интегральных уравнений // Изв. вузов. Приборостроение. 2019. Т. 62, №5. С. 424–432.
14. Радиоэлектронные системы. Основы построения и теория / Под ред. Я. Д. Ширмана. М.: ЗАО МАКВИС, 1998. 826 с.
15. Алешкин А. П., Бахолдин В. С., Гаврилов Д. А., Леконцев Д. А. Обработка сигналов спутниковых навигационных систем с квадратурным уплотнением и частотным разделением // Изв. вузов. Приборостроение. 2016. Т. 53, № 4. С. 261–267.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

- Владимир Львович Румянцев** — д.т.н., профессор; АО ЦКБА; начальник отдела; E-mail: vlroom@yandex.ru
- Иван Александрович Ростовцев** — адъютант; Филиал Военной академии материально-технического обеспечения; E-mail: paii@mil.ru
- Александр Николаевич Карпов** — аспирант; Филиал Военной академии материально-технического обеспечения
- Дмитрий Витальевич Титов** — д.т.н., доцент; Юго-Западный государственный университет; профессор кафедры

Поступила в редакцию 09.11.2023; одобрена после рецензирования 17.01.2024; принята к публикации 16.04.2024.

REFERENCES

1. Verba V. S., Neronskiy L. B., Osipov I. G., Turuk V. E. *Radiolokatsionnyye sistemy zemleobzora kosmicheskogo bazirovaniya* (Space-Based Land Survey Radar Systems), Moscow, 2010, 680 p. (in Russ.)
2. Dulevich V. E. *Teoreticheskiye osnovy radiolokatsii* (Theoretical Foundations of Radar), Moscow, 1978. (in Russ.)
3. Shkolny L. A. *Radiolokatsionnyye sistemy vozduшной razvedki, deshifrovaniye radiolokatsionnykh izobrazheniy* (Aerial Reconnaissance Radar Systems, Decoding of Radar Images), Moscow, 2008, 531 p. (in Russ.)
4. Bakulev P. A., Stepin V. M. *Metody i ustroystva selektsii dvizhushchikh tseley* (Methods and Devices for Selecting Moving Targets), Moscow, 1986, 288 p. (in Russ.)
5. Skolnik M., ed., *Radar handbook*, McGraw-Hill, 1990.
6. Lukoshkin A. P., ed., *Obrabotka signalov v mnogokanal'nykh RLS* (Signal Processing in Multi-Channel Radars), Moscow, 1983, 328 p. (in Russ.)
7. Cramer H. *Mathematical Methods of Statistics*, Princeton University Press Princeton, 1946.
8. Ventzel E. S. *Teoriya veroyatnostey i yeye inzhenernyye prilozheniya* (Probability Theory and its Engineering Applications), Moscow, 1988, 560 p. (in Russ.)
9. Akinshin N. S., Peteshov A. V., Rumyantsev V. L., Khomyakov K. A. *News of Tula State University. Technical Sciences*, 2018, no. 9, pp. 69–79. (in Russ.)

10. Koshelev V. I., Belokurov V. A. *Tsifrovaya obrabotka signalov*, 2005, no. 1, pp. 41–46. (in Russ.)
11. Strakhova L. A. *Izvestiya vuzov. Radioelektronika*, 1988, no. 4, pp. 8–15. (in Russ.)
12. Bystrov R. P., Dmitriyev V. G., Potapov A. A., Sokolov A. V. *Problemy radiolokatsionnogo obnaruzheniya malokontrastnykh ob"yektov. Voprosy perspektivnoy radiolokatsii* (Problems of Radar Detection of Low-Contrast Objects. Issues of Advanced Radar), Moscow, 2003, pp. 20–48. (in Russ.)
13. Ziatdinov S. I. *Journal of Instrument Engineering*, 2019, no. 5(62), pp. 424–432. (in Russ.)
14. Shirman Ya. D., ed., *Radioelektronnyye sistemy. Osnovy postroyeniya i teoriya* (Radioelectronic Systems. Fundamentals of Construction and Theory), Moscow, 1998, 826 p. (in Russ.)
15. Aleshkin A. P., Bakholdin V. S., Gavrilov D. A., Lekontsev D. A. *Journal of Instrument Engineering*, 2016, no. 4(53), pp. 261–267. (in Russ.)

DATA ON AUTHOR

- | | | |
|-------------------------------|---|---|
| Vladimir L. Rumiantsev | — | Dr. Sci., Professor; Central Design Bureau of Apparatus Engineering; E-mail: vlroom@yandex.ru |
| Ivan A. Rostovtsev | — | Military Academy of Logistics, Penza Branch; Adjunct; E-mail: paii@mil.ru |
| Alexander N. Karpov | — | Military Academy of Logistics, Penza Branch; Post-Graduate Student |
| Dmitriy V. Titov | — | Dr. Sci., Associate Professor; Southwest State University; Professor |

Received 09.11.2023; approved after reviewing 17.01.2024; accepted for publication 16.04.2024