

АЛГОРИТМ ОПТИМАЛЬНОГО ОБНАРУЖЕНИЯ В ПОЛЯРИМЕТРИЧЕСКОЙ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ

Е. А. Пафиков¹, А. В. Петешов², А. С. Ишков³

¹ Филиал Военной академии материально-технического обеспечения имени генерала армии А. В. Хрулева в г. Пензе, Пенза, Россия
² Военный университет радиоэлектроники, Череповец, Россия
³ Пензенский государственный университет, Пенза, Россия
¹ evgeniyapafikov@mail.ru, ² peteshov76@mail.ru, ³ asihkov@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* В поляризационных радиолокационных системах с синтезированной апертурой в сравнении с обычными, использующими излучение и прием сигналов фиксированной поляризации, организуются дополнительный канал излучения и три дополнительных канала приема. Это существенно увеличивает количество информации о радиолокационных объектах и расширяет возможности по повышению качества обнаружения целей. Оптимальный поляриметрический обнаружитель вводится для идеальной ситуации, когда характеристики помехи полностью известны. Такой алгоритм обеспечивает потенциально достижимые характеристики обнаружения цели на фоне помехи. В общей постановке задача обнаружения цели на фоне помех формулируется как задача проверки статистических гипотез о наличии или отсутствии цели по наблюдаемой реализации сигнала. *Материалы и методы.* Предлагается рассмотреть алгоритм оптимального обнаружения в поляриметрической радиолокационной системе, обеспечивающий лучшее среди множества других алгоритмов соотношение между качеством обнаружения и количеством требуемой для этого статистической информации. Провести исследования алгоритма обнаружения, связанного с использованием выбеливающего фильтра. Определить алгоритм оптимального обнаружения в поляриметрической радиолокационной системе и оценить его эффективность. *Результаты и выводы.* Таким образом, предложен алгоритм и на основе его обнаружитель с использованием поляриметрического выбеливающего фильтра, обеспечивающий почти такие же характеристики целей, как и оптимальный поляриметрический обнаружитель, и может обеспечить лучшее среди множества других алгоритмов соотношение между качеством обнаружения и количеством требуемой для этого статистической информации.

Ключевые слова: обнаружение, поляризация, фильтр, помеха, алгоритм

Для цитирования: Пафиков Е. А., Петешов А. В., Ишков А. С. Алгоритм оптимального обнаружения в поляриметрической радиолокационной системе // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 4. С. 88–94. doi: 10.21685/2307-4205-2023-4-8

OPTIMAL DETECTION ALGORITHM IN A POLARIMETRIC RADAR SYSTEM

E.A. Pafikov¹, A.V. Peteshov², A.S. Ishkov³

¹ Branch of the Military Academy of Logistics named after Army General A.V. Khrulev in Penza, Penza, Russia
² Military University of Radio Electronics, Cherepovets, Russia
³ Penza State University, Penza, Russia
¹ evgeniyapafikov@mail.ru, ² peteshov76@mail.ru, ³ asihkov@mail.ru

Abstract. *Background.* In polarization radar systems with synthetic aperture (SAR), in comparison with conventional ones that use the emission and reception of signals of a fixed polarization, an additional emission channel and three additional reception channels are organized. This significantly increases the amount of information about radar objects and expands the possibilities for improving the quality of target detection. The optimal polarimetric detector is introduced for an ideal situation where the characteristics of the interference are completely known. Such an algorithm provides potentially achievable target detection performance against a background of interference. In the general formulation, the task of detecting a target against a background of noise is formulated as a task of testing statistical hypotheses about the presence or absence of a target based on the observed signal implementation. *Materials and methods.* The article proposes to consider an algorithm for optimal detection in a polarimetric radar system, which provides the best ratio among many other algorithms between the quality of detection and the amount of statistical information required for this. Conduct research on the detection algorithm associated with the use of a whitening filter. Determine the optimal

detection algorithm in a polarimetric radar system and evaluate its effectiveness. *Results and conclusions.* Thus, an algorithm has been proposed and, based on it, a detector using a polarimetric whitening filter (PWF), which provides almost the same target characteristics as an optimal polarimetric detector, and can provide the best ratio among many other algorithms between the quality of detection and the amount of statistical data required for this information.

Keywords: detection, polarization, filter, interference, algorithm

For citation: Pafikov E.A., Peteshov A.V., Ishkov A.S. Optimal detection algorithm in a polarimetric radar system. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2023;(4):88–94. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2023-4-8

Введение

Реализация потенциальных возможностей радиолокационной системы с синтезированной апертурой (РСА) в составе бортовых комплексов обуславливает необходимость совершенствования алгоритмов обработки информации для обнаружения и распознавания малоразмерных наземных объектов при наличии воздействующих помех, а также ночью и в условиях плохой видимости, когда другие средства разведки малоэффективны. Как известно из общей теории, оптимальный алгоритм принятия решения сводится к нахождению отношения правдоподобия и сравнению его с пороговым уровнем. Значение порогового уровня определяется выбранным критерием оптимальности. При обнаружении сигналов обычно используется критерий Неймана – Пирсона, применение которого обеспечивает максимальную вероятность правильного обнаружения при заданной вероятности ложной тревоги.

Алгоритм оптимального обнаружения в поляриметрической радиолокационной системе

Рассмотрим обнаружение стабильной цели на фоне отражений от земной поверхности. Будем полагать, что помеховый векторный сигнал является гауссовым с плотностью вероятности (1)

$$w(\mathbf{X}_t) = \frac{1}{\pi^3 |\mathbf{K}_t|} \exp(-\mathbf{X}_t^\dagger \mathbf{K}_t^{-1} \mathbf{X}_t). \quad (1)$$

Параметры ковариационной матрицы помехи \mathbf{K}_c , как и параметры векторного сигнала \mathbf{X}_t , отраженного целью, считаем полностью известными. Функции правдоподобия наблюдаемого векторного сигнала, который обозначим вектором \mathbf{Y} , при гипотезах о наличии и отсутствии цели являются гауссовыми с ковариационной матрицей \mathbf{K}_c , но различными средними значениями, и для логарифма отношения правдоподобия получаем следующее выражение:

$$\ln L = \operatorname{Re}\{\mathbf{Y}^\dagger \mathbf{K}_c^{-1} \mathbf{X}_t\} - \mathbf{X}_t^\dagger \mathbf{K}_c^{-1} \mathbf{X}_t / 2 = \zeta - d^2 / 2, \quad (2)$$

где

$$\zeta = \operatorname{Re}\{\mathbf{Y}^\dagger \mathbf{K}^{-1} \mathbf{X}_t\} \quad (3)$$

– достаточная статистика, определяющая оптимальный алгоритм обработки входного сигнала \mathbf{Y} , а величина

$$d^2 = \mathbf{X}_t^\dagger \mathbf{K}_c^{-1} \mathbf{X}_t \quad (4)$$

представляет собой обобщенное отношение сигнал-помеха, или параметр обнаружения.

Оптимальный по критерию Неймана – Пирсона алгоритм обнаружения формулируется следующим образом: принимается решение о наличии цели, если $\zeta \geq \zeta_0$, и решение об отсутствии цели в противном случае. При этом величина порога ζ_0 определяется заданной вероятностью ложной тревоги. Таким образом, оптимальный поляризационный обнаружитель стабильной цели состоит из устройства оптимальной обработки входного векторного сигнала \mathbf{Y} , проводимой в соответствии с выражением (3), и порогового устройства.

Рассчитаем рабочие характеристики оптимального обнаружителя. Так как достаточная статистика (3) при отсутствии и наличии сигнала представляет собой линейную комбинацию гауссовских случайных величин и, следовательно, распределена по гауссовскому закону, то вероятности правильного обнаружения D и ложной тревоги F легко вычисляются аналитически, и для них получаем следующие выражения:

$$D = 0,5 + 0,5\Psi\left(\frac{\xi_0 - d^2}{d}\right), \quad F = 0,5 - 0,5\Psi\left(\frac{\xi_0}{d}\right), \quad (5)$$

где $\Psi(u)$ – интеграл вероятности.

Полученные соотношения были использованы для расчета характеристик обнаружения различных типов стабильных целей на фоне отражений от земной поверхности. В качестве целей рассматривались двугранный и трехгранный уголкового отражатели, для которых вид матриц рассеяния и векторных отраженных сигналов приведены в предыдущем разделе, а также цель в виде длинного тонкого провода, ориентированного в плоскости наблюдения под углом $\theta = 45^\circ$. В линейном поляризованном базисе матрица рассеяния такой цели имеет вид

$$\mathbf{S}_e = c \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}, \quad (6)$$

а векторный отраженный сигнал записывается в виде

$$\mathbf{X}_e = c \begin{pmatrix} 1 & \sqrt{2} & 1 \end{pmatrix}^T. \quad (7)$$

Ковариационная матрица отражений от земной поверхности принята в виде выражения

$$\mathbf{K}_c = \sigma_{hnc} \begin{pmatrix} 1 & 0 & \sqrt{\gamma_c} \rho_{13c} \\ 0 & 2\varepsilon_c & 0 \\ \sqrt{\gamma_c} \rho_{13c} & 0 & \gamma_c \end{pmatrix} \text{ со значениями параметров } \sigma_{hnc} = 0,107; \varepsilon_c = 0,34; \gamma_c = 1; \rho_{13c} = 0,33 [1].$$

Результаты расчетов характеристик обнаружения для вероятности ложной тревоги $F = 10^{-4}$ приведены на рис. 1.

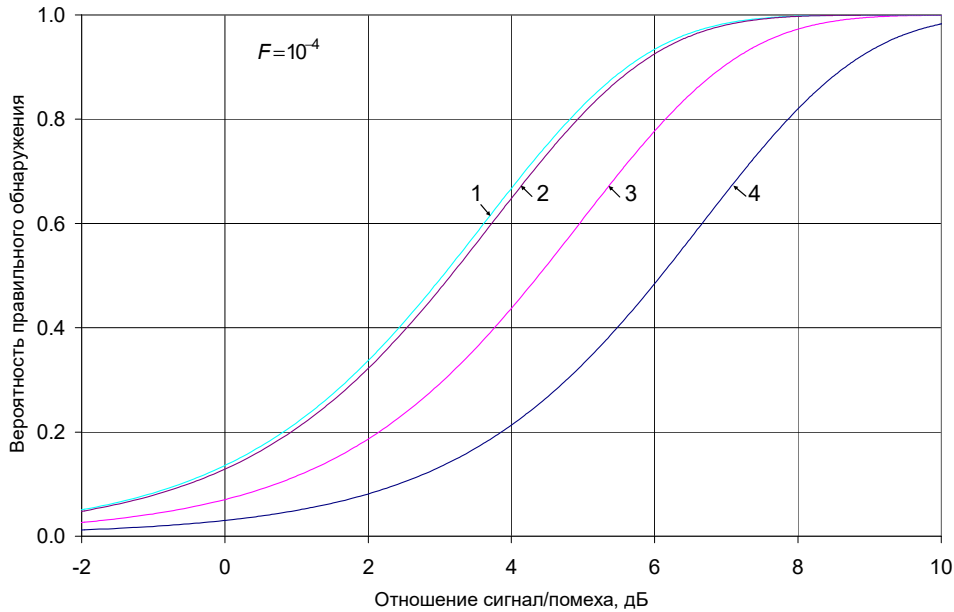


Рис. 1. Характеристики обнаружения стабильной цели на фоне земной поверхности: 1 – двугранный уголкового отражатель ($\theta = 0^\circ$); 2 – двугранный уголкового отражатель ($\theta = 45^\circ$); 3 – длинный провод ($\theta = 45^\circ$); 4 – трехгранный уголкового отражатель

Представленные кривые обнаружения позволяют определить значения порогового отношения сигнал-помеха на входе приемного устройства поляризационной радиолокационной станции (РЛС), при которых вероятность обнаружения цели будет не меньше заданной. В качестве примера в табл. 1 приведены значения пороговых отношений сигнал-помеха q_0 для вероятности правильного обнаружения $D = 0,8$. Как видим, обнаружение на фоне земной поверхности трехгранного уголка более затруднительно, чем двугранного уголка. Связано это с тем, что статистические поляризационные характеристики помехи более подобны трехгранному, чем двугранному уголкового отражателю.

Практический интерес представляет сравнение характеристик обнаружения целей РЛС с полным поляризационным зондированием (ППЗ) и одноканальной по поляризации РЛС. В одноканальной по поляризации РЛС доступным наблюдению и обработке является лишь только один из элементов матрицы рассеяния – верхний или нижний элемент главной диагонали (горизонтальная или вертикальная поляризация). Для определенности будем полагать, что однополяризационная РЛС излучает и принимает сигналы горизонтальной поляризации. Сразу отметим, что для такой РЛС двугранный уголкового отражатель с углом ориентации $\theta = 45^\circ$ является невидимым.

Таблица 1

Пороговые отношения сигнал-помеха, дБ

Цель	q_0 , дБ
Двугранный уголкового отражатель ($\theta = 0^\circ$)	4,7
Двугранный уголкового отражатель ($\theta = 45^\circ$)	5,0
Длинный провод ($\theta = 45^\circ$)	6,2
Трехгранный уголкового отражатель	7,8

В РЛС с ППЗ полная мощность сигнала, отраженного целью, пропорциональна ее полной эффективной поверхности рассеяния (ЭПР), а в однополяризационной РЛС она пропорциональна значению ЭПР цели на горизонтальной поляризации. Мощность помехи в РЛС с ППЗ равна сумме диагональных элементов ковариационной матрицы помехи, а в однополяризационной РЛС – только ее первому диагональному элементу. Как легко показать, отношение сигнал-помеха q_{hh} на входе приемника однополяризационной РЛС связано с отношением сигнал-помеха q на входе приемника РЛС с ППЗ соотношением [2, 3]

$$q_{hh} = q \frac{1 + 2\varepsilon_c + \gamma_c}{1 + 2\varepsilon_t + \gamma_t}, \quad (8)$$

где

$$\varepsilon_t = |\dot{X}_{hvt}|^2 / |\dot{X}_{hht}|^2, \quad \gamma_t = |\dot{X}_{vvt}|^2 / |\dot{X}_{hht}|^2$$

есть отношения ЭПР цели на перекрестной и вертикальной поляризации к значению ЭПР на горизонтальной поляризации.

Потребуем, чтобы обе РЛС в фиксированной помехово-целевой обстановке обеспечивали одинаковую вероятность правильного обнаружения $D = 0,8$ при фиксированной вероятности ложной тревоги $F = 10^{-4}$. Тогда для заданного типа цели по данным из табл. 1 можно определить значение порогового отношения сигнал-помеха q_0 в РЛС с ППЗ, а затем вычислить соответствующее ему значение отношения сигнал-помеха q_{hh} на входе приемника однополяризационной РЛС.

В однополяризационной РЛС осуществляется одноканальная оптимальная обработка сигнала с полностью известными параметрами на фоне некоррелированной гауссовой помехи. При этом заданное качество обнаружения ($D = 0,8, F = 10^{-4}$) обеспечивается при отношении сигнал-помеха 10,9 дБ (см., например, [4]). Следовательно, выигрыш в помехоустойчивости обнаружения цели РЛС с ППЗ будет равен

$$\Delta q = 10,9 - q_{hh}. \quad (9)$$

В соответствии с изложенной методикой проведены расчеты выигрыша для трех типов целей. Результаты расчетов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Выигрыш в помехоустойчивости обнаружения, дБ

Цель	Δq , дБ
Двугранный уголкового отражатель ($\theta = 0^\circ$)	4,9
Длинный провод ($\theta = 45^\circ$)	6,4
Трехгранный уголкового отражатель	2,0

Как видим, значение выигрыша в помехоустойчивости обнаружения целей при переходе от РЛС с фиксированной поляризацией к РЛС с полным поляризационным зондированием зависит от типа цели и лежит в диапазоне от 2 до 6,4 дБ.

Выигрыш в помехоустойчивости обнаружения может быть интерпретирован как повышение радиолокационного контраста цели за счет использования дополнительной информации, содержащейся в поляризационных матрицах целей и помеховых отражений. Степень повышения контраста зависит от соотношения между поляризационными характеристиками целей и помех.

Реализация оптимального поляризационного обнаружителя сигналов на фоне гауссовской помехи требует априорного знания поляризационных ковариационных матриц и цели и помехи, а также средних значений элементов матрицы рассеяния цели. В реальных условиях такие статистические данные недоступны. Априорную информацию о статистике целей вообще иметь невозможно, а получить точную информацию о статистических характеристиках помех затруднительно ввиду их пространственной и временной изменчивости, а также зависимости от типа земной поверхности. В этой связи представляют интерес алгоритмы обнаружения, работающие в условиях неполной априорной информации. Одним из таких алгоритмов является алгоритм с использованием поляриметрического выбеливающего фильтра [5].

Поляриметрический выбеливающий фильтр синтезируется по критерию минимума отношения s/m среднеквадратического отклонения мощности помехи к ее среднему значению. Для реализации ПВФ требуется априорное знание ковариационной матрицы помехи. Обработка принимаемого векторного сигнала \mathbf{X} заключается в вычислении квадратичной формы

$$y = \mathbf{X}^T \mathbf{K}_c^{-1} \mathbf{X}, \quad (10)$$

где \mathbf{K}_c^{-1} – матрица, обратная ковариационной матрице помехи. Величина y формируется как некогерентная сумма некоррелированных компонент, чем и достигается снижение среднеквадратического отклонения мощности помехи.

Алгоритм обнаружения с использованием выбеливающего фильтра определяется следующим правилом:

$$y \underset{\text{помеха}}{\overset{\text{цель}}{>}} \hat{m}_y + \hat{\sigma}_y K_{CFAR}, \quad (11)$$

где \hat{m}_y и $\hat{\sigma}_y$ – оценки среднего значения и среднеквадратического отклонения y , получаемые по соседним с испытываемым элементом разрешения, а K_{CFAR} – константа, зависящая от заданной вероятности ложных тревог. При гауссовом распределении помехи обнаружитель, определяемый выражением (11), обеспечивает постоянный уровень ложных тревог.

Развитием поляриметрического выбеливающего фильтра является адаптивный ПВФ, не требующий знания ковариационной матрицы помехи. Обработка принимаемого векторного сигнала в таком фильтре описывается таким же выражением, как и выражение (10), но с заменой известной ковариационной функции на ее оценку по сигналам из нескольких элементов разрешения.

На основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований в работах [2, 6] утверждается, что обнаружитель с использованием ПВФ обеспечивает почти такие же характеристики целей, как и оптимальный поляриметрический обнаружитель, и может обеспечить лучшее среди множества других алгоритмов соотношение между качеством обнаружения и количеством требуемой для этого статистической информации.

Заключение

Таким образом, предложенный алгоритм обнаружения с использованием ПВФ, синтезированный по критерию минимума отношения среднеквадратического отклонения мощности помехи к ее среднему значению обеспечивает почти такие же характеристики целей, как и оптимальный поляриметрический обнаружитель, и может обеспечить лучшее среди множества других алгоритмов соотношение между качеством обнаружения и количеством требуемой для этого статистической информации.

Список литературы

1. Зубкович С. Г. Статистические характеристики сигналов, отраженных от земной поверхности. М. : Сов. радио, 1968. 212 с.

2. Козлов А. И., Логвин А. И., Сарычев В. А. Поляризация радиоволн (Поляризационная структура радиолокационных сигналов). М. : Радиотехника, 2005. 702 с.
3. Козлов А. И., Логвин А. И., Сарычев В. А. Поляризация радиоволн (Радиолокационная поляриметрия). М. : Радиотехника, 2007. 638 с.
4. Быстров Р. П. Радиолокационные системы обнаружения наземных объектов в короткой части миллиметрового диапазона волн. М. : Технология, 2002. Т. 1, 2. 455 с.
5. Novak L. M., Halversen S. D., Owirka G. J., Hiatt M. Effects of Polarization and Resolution on SAR ATR // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 1997. Vol. 33, № 1. P. 102–115.
6. Poelman A. J. Nonlinear polarization-vector translation in radar systems. A promising concept for real-time polarization-vector signal processing via a single-notch polarization suppression filter // Proc. Inet. Elect. Eng., Pt. F. 1984. Vol. 131, № 5. P. 451–465.
7. Пафиков Е. А., Годунов А. И., Юрков Н. К., Николаев О. В. Алгоритмы адаптивного обнаружения сигнала, отраженного от малоразмерных наземных целей // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 2. С. 32–43. doi:10.21685/2307-4205-2023-2-4
8. Волотов Е. М., Волотова Т. А., Митрофанов И. В., Митрофанов Е. И. Модель погрешности определения параметров траектории при использовании системы регистрации на базе видеочамер общего назначения // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 1. С. 29–37. doi:10.21685/2307-4205-2023-1-4

References

1. Zubkovich S.G. *Statisticheskie kharakteristiki signalov, otrazhennykh ot zemnoy poverkhnosti = Statistical characteristics of signals reflected from the Earth's surface*. Moscow: Sov. radio, 1968:212. (In Russ.)
2. Kozlov A.I., Logvin A.I., Sarychev V.A. *Polyarizatsiya radiovoln (Polyarizatsionnaya struktura radiolokatsionnykh signalov) = Polarization of radio waves (Polarization structure of radar signals)*. Moscow: Radiotekhnika, 2005:702. (In Russ.)
3. Kozlov A.I., Logvin A.I., Sarychev V.A. *Polyarizatsiya radiovoln (Radiolokatsionnaya polyarimetriya) = Polarization of radio waves (Radar polarimetry)*. Moscow: Radiotekhnika, 2007:638. (In Russ.)
4. Bystrov R.P. *Radiolokatsionnye sistemy obnaruzheniya nazemnykh ob"ektov v korotkoy chasti millimetrovogo diapazona voln = Radar systems for detecting ground objects in the short part of the millimeter wave range*. Moscow: Tekhnologiya, 2002;1, 2:455. (In Russ.)
5. Novak L.M., Halversen S.D., Owirka G.J., Hiatt M. Effects of Polarization and Resolution on SAR ATR. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. 1997;33(1):102–115.
6. Poelman A.J. Nonlinear polarization-vector translation in radar systems. A promising concept for real-time polarization-vector signal processing via a single-notch polarization suppression filter. *Proc. Inet. Elect. Eng., Pt. F*. 1984;131(5):451–465.
7. Pafikov E.A., Godunov A.I., Yurkov N.K., Nikolaev O.V. Algorithms for adaptive detection of a signal reflected from small-sized ground targets. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2023;(2):32–43. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2023-2-4
8. Volotov E.M., Volotova T.A., Mitrofanov I.V., Mitrofanov E.I. Model of the error in determining trajectory parameters when using a registration system based on general-purpose video cameras. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2023;(1):29–37. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2023-1-4

Информация об авторах / Information about the authors

Евгений Анатольевич Пафиков

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры производства
и эксплуатации боеприпасов,
Филиал Военной академии материально-
технического обеспечения
имени генерала армии А. В. Хрулева в г. Пензе
(Россия, г. Пенза, Военный городок)
E-mail: evgeniy_pafikov@mail.ru

Андрей Владимирович Петешов

кандидат технических наук, доцент,
начальник кафедры радиоэлектронных средств,
Военный университет радиоэлектроники
(Россия, г. Череповец, ул. Ленина, 123)
E-mail: peteshov_76@mail.ru

Evgeniy A. Pafikov

Candidate of technical sciences, associate professor,
associate professor of the sub-department
of production and operation of ammunition,
Branch of the Military Academy of Logistics
named after Army General A.V. Khrulev in Penza
(Military Town, Penza, Russia)

Andrey V. Peteshov

Candidate of technical sciences, associate professor,
head of the sub-department of radioelectronics,
Military University of Radio Electronics
(123 Lenina street, Cherepovets, Russia)

Антон Сергеевич Ишков

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры радиотехники
и радиоэлектронных систем,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: asihkov@mail.ru

Anton S. Ishkov

Candidate of technical sciences, associate professor,
associate professor of the sub-department
of radio engineering and radioelectronic systems,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию/Received 07.09.2023

Поступила после рецензирования/Revised 14.10.2023

Принята к публикации/Accepted 23.10.2023