



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2019-125-7-121-128>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 629.325 + 519.5

КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ДВУХКАНАЛЬНОЙ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЕ КАК СПОСОБ СНИЖЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТИ СРЫВА АВТОМАТИЧЕСКОГО СОПРОВОЖДЕНИЯ МАЛОКОНТРАСТНЫХ ОБЪЕКТОВ

ХИЖНЯК А.В.

Военная академия Республики Беларусь, г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 14 ноября 2019

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2019

Аннотация. В статье рассмотрена работа корреляционного алгоритма автоматического сопровождения объектов интереса в двухканальной оптико-электронной системе в условиях сложной фоновой обстановки и наличия преднамеренных помех. Сложными в статье считаются условия, когда контраст искомого объекта в обоих каналах незначителен, но не равен нулю. Под преднамеренными помехами подразумеваются маскирующие помехи естественного и искусственного происхождения, способствующие снижению контраста объекта в обоих каналах. Под двухканальной понимается оптико-электронная система, которая включает в себя каналы видимого и инфракрасного диапазонов. Считается, что разнеспектральные изображения обоих каналов приведены к единому времени и масштабу, что позволяет проводить их комплексирование, используя различные методы. Целью настоящей статьи является доказательство снижения вероятности срыва автоматического сопровождения при комплексировании исходных изображений видимого и инфракрасного диапазонов, когда контраст искомого объекта в обоих каналах незначителен. Для исследования используются математический аппарат теории случайных функций и имитационное моделирование с последующей статистической обработкой данных. Показано, что вероятность срыва, характеризующаяся отношением коэффициентов корреляции двух фрагментов изображений, одно из которых содержит искомый объект, а второе – нет, зависит как от коэффициентов корреляции, так и от значений их средних квадратических отклонений. Проведенное моделирование показало, что срыв сопровождения наступает как при равенстве средних квадратических отклонений данных коэффициентов корреляции, так и при их разных значениях, причем увеличение их разности способствует повышению вероятности срыва. В статье показано, что вероятность срыва в двухканальной оптико-электронной системе будет уменьшаться при использовании двух каналов по сравнению с работой только в видимом либо инфракрасном канале. Полученные результаты обосновывают перспективность использования комплексирования изображений в многоканальных системах автоматического сопровождения объектов в условиях сложной фоновой обстановки и наличия преднамеренных помех.

Ключевые слова: контраст, коэффициент корреляции, эталонное изображение, текущее изображение.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Хижняк А.В. Комплексирование изображений в двухканальной оптико-электронной системе как способ снижения вероятности срыва автоматического сопровождения малококонтрастных объектов. Доклады БГУИР. 2019; 7(125): 121-128.

COMPLEXING IMAGES IN A TWO-CHANNEL OPTICAL-ELECTRONIC SYSTEM AS A METHOD OF REDUCING THE PROBABILITY OF DISAPPOINTING AN AUTOMATIC SURVEILLANCE OF LOW CONTRAST OBJECTS

ALEXANDER V. KHIZHNIAK

Military Academy of the Republic of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

Submitted 14 November 2019

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2019

Abstract. The paper discusses the work of the correlation algorithm for automatically tracking objects of interest in a two-channel optical-electronic system in a complex background-target environment and the presence of intentional interference. Conditions in which the contrast of the desired object in both channels is negligible but not equal to zero are considered difficult in the paper. Intentional interference refers to masking interference of natural and artificial origin, which helps to reduce the contrast of the object in both channels. By two-channel means an optical-electronic system, which includes channels of the visible and infrared ranges. It is believed that the multi-spectral images of both channels are reduced to a single time and scale, which allows them to be integrated using various methods. The purpose of this paper is to prove that the likelihood of disruption of automatic tracking is reduced when complexing the source images of the visible and infrared ranges, when the contrast of the desired object in both channels is negligible. For research the mathematical apparatus of the theory of random functions and simulation with subsequent statistical data processing are used. It is shown that the probability of disruption, characterized by the ratio of the correlation coefficients of two fragments of images, one of which contains the desired object, and the second not, depends on both the correlation coefficients and the values of their mean square deviations. The simulation shows that the breakdown of tracking occurs both when the mean square deviations of these correlation coefficients are equal, and at their different values, moreover, an increase in their difference increases the probability of a breakdown. The article shows that the likelihood of a breakdown in a two-channel optoelectronic system will decrease when using two channels, compared to working only in the visible or infrared channel. The obtained results substantiate the promise of using image complexing in multichannel systems of automatic tracking of objects in a complex background-target environment and the presence of deliberate interference.

Keywords: contrast, correlation coefficient, reference image, current image.

Conflict of interests. The author declares no conflict of interests.

For citation. Khizhniak A.V. Complexing images in a two-channel optical-electronic system as a method of reducing the probability of disappointing an automatic surveillance of low contrast objects. Doklady BGUIR. 2019; 7(125): 121-128.

Введение

Автоматическое сопровождение объектов интереса является важнейшей составляющей различных систем, работающих в масштабе реального времени. Неотъемлемой характеристикой этого процесса является его устойчивость к срывам в заданном интервале времени. Если контраст объекта на окружающем фоне высок, то проблем с реализацией сопровождения не возникает. Однако когда он незначителен и сравним с допустимым порогом, например, в условиях сложной фоно-целевой обстановки, то как информативность изображений, так и эффективность автоматического сопровождения резко падают.

Известны различные методы автоматического сопровождения, среди которых корреляционный занимает свое достойное место. Это связано с тем, что он имеет хорошую эффективность при сопровождении замаскированных и малоконтрастных объектов в силу косвенного использования не только яркостных характеристик объектов, но и их формы

и положения. В то же время возрастание шумовой составляющей на изображении негативно сказывается на качестве сопровождения.

В [1] с помощью моделирования авторами показана возможность применения комплексирования для повышения эффективности работы корреляционно-экстремальной системы сопровождения объекта в условиях сложного фона и наличия помех, когда уровень его контраста в инфракрасном и видимом диапазонах незначителен. На первый взгляд, в этом утверждении нет ничего нового, в том смысле, что, используя достоинства каждого канала, можно повысить качество в целом. Однако в современной литературе отсутствуют как общие, так и частные теоретические доказательства этого. Поэтому целью настоящей статьи автор ставит задачу доказательства этого, используя методы теории вероятностей и математической статистики.

Основная часть

Рассмотрим вкратце ситуацию срыва автоматического сопровождения для корреляционного алгоритма. Эталонное изображение (ЭИ) обозначено на рис. 1 буквой T . В области W имеются два окна I и F , причем первое содержит искомый объект, а второе – нет. Пиксели, выделенные темным цветом, принадлежат объекту, а светлые – фону.

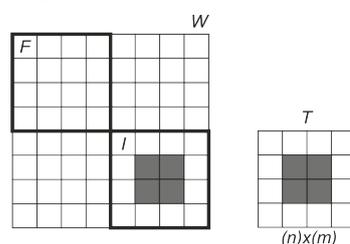


Рис. 1. Фрагмент эталонного и текущего изображений
Fig. 1. Fragment of the reference and current images

Окна I и F имеют размеры, равные размерам ЭИ T . При совпадении окон F и T , а также I и T вычисляются коэффициенты корреляции. Срыв сопровождения произойдет, если коэффициент корреляции между окнами F и T будет не менее, чем между I и T .

Физический смысл срыва заключается в том, что в окне F появился некий ложный объект с достаточно высокими значениями яркостей пикселей, похожий на искомый и не содержащийся в ЭИ. Появление ложных объектов при работе в условиях сложного фона земной поверхности – это характерная ситуация для корреляционно-экстремальных систем. Многие разработчики современных оптико-электронных приборов прикладывают серьезные усилия для решения подобных задач, однако считать ее решенной нельзя.

Обозначим K_1 – коэффициент корреляции между окнами F и T , K_2 – коэффициент корреляции между окнами I и T . Под вероятностью срыва автоматического сопровождения будем понимать вероятность того, что значение $K_1 \geq K_2$. Обозначим отношение коэффициентов корреляции

$$\mu = \frac{K_1}{K_2}. \quad (1)$$

Факту срыва сопровождения будет соответствовать значение $\mu \geq 1$ [8]. Поэтому для нахождения вероятности срыва сопровождения следует определить вероятность того, что выражение (1) превысит значение единицы. Найдем плотность распределения случайной величины μ , как частного двух случайных величин. Распределение яркости пикселей на изображении во времени, а следовательно, и коэффициентов корреляции текущих и эталонных изображений, будет подчинено нормальному закону с заданными значениями математического ожидания и среднего квадратического отклонения (СКО) (σ) [2, 3]. Применение нормального закона распределения яркости пикселей на изображении справедливо согласно центральной предельной теоремы для одинаково распределенных

слагаемых [7], а также доказательства данной теоремы А. М. Ляпуновым для неодинаково распределенных случайных величин [4].

Согласно [5] плотность вероятности оценок частного двух некоррелированных и нормально распределенных случайных величин K_1 и K_2 с коэффициентом взаимной корреляции R будет иметь вид

$$f\left(\frac{K_1}{K_2}\right) = \frac{\sqrt{1-R^2}}{\pi \cdot \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_2} - 2 \cdot R \cdot \frac{K_1}{K_2} + \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \cdot \left(\frac{K_1}{K_2}\right)^2 \right)}. \quad (2)$$

Если величины K_1 и K_2 некоррелированные ($R = 0$), то формула переходит в распределение Коши:

$$f\left(\frac{K_1}{K_2}\right) = \frac{\sigma_1 \cdot \sigma_2}{\pi \cdot \left(\sigma_1^2 + \sigma_2^2 \left(\frac{K_1}{K_2}\right)^2 \right)}. \quad (3)$$

С целью определения требуемых значений σ_1 и σ_2 коэффициентов корреляции K_1 и K_2 в выражении (3) был проведен ряд несложных модельных экспериментов, один из результатов которого представлен на рис. 2. На первом этапе было смоделировано 1080 значений коэффициентов корреляции K_1 и K_2 со средним значением $K_{cp} = 0,5$, но с разными значениями σ_1 и σ_2 , причем $\sigma_1 < \sigma_2$, ($\sigma_1 = 0,0025$, что составляет 0,5 % от среднего значения; $\sigma_2 = 0,005$, что составляет 1 % от среднего значения). Количество значений K_1 и K_2 соответствует значению доверительной вероятности $\beta = 0,9$ и относительной погрешности 5 % [6]. Для данных условий разность между СКО коэффициентов корреляции составила 0,5 %. Анализ результатов моделирования (рис. 2) показал, что максимально возможное значение отношения коэффициентов корреляции для данных условий составляет $\mu = 1,05 > 1$. Используя аналогичный подход для значений $K_1 = K_2 = 0,5$ ($\sigma_1 = 0,005$, $\sigma_2 = 0,015$), т. е. когда разность между СКО коэффициентов корреляции составляет 3 %, значение $\mu = 1,132 > 1$. При $K_1 = K_2 = 0,5$ ($\sigma_1 = 0,005$, $\sigma_2 = 0,025$), т. е. когда разность между СКО коэффициентов корреляции составляет 5 %, отношение $\mu = 1,204 > 1$ и т. д. Таким образом, можно сделать вывод, что увеличение разности между СКО (σ_1 и σ_2 при $\sigma_1 < \sigma_2$) коэффициентов корреляции (K_1 и K_2) способствует повышению отношения коэффициентов корреляции μ , что, в свою очередь, будет повышать вероятность срыва.

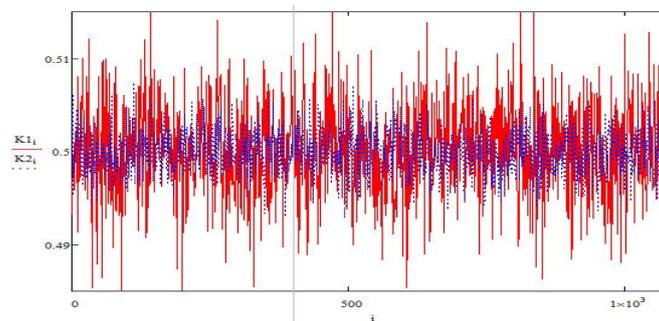


Рис. 2. Результаты моделирования значений коэффициентов корреляции $K_1 = K_2 = 0,5$
($\sigma_1 = 0,0025$, $\sigma_2 = 0,005$)

Fig. 2. The results of modeling the values of the correlation coefficients $K_1 = K_2 = 0,5$ ($\sigma_1 = 0,0025$, $\sigma_2 = 0,005$)

На втором этапе также было смоделировано 1080 значений коэффициентов корреляции K_1 и K_2 со средним значением $K_{cp} = 0,5$, но с разными значениями σ_1 и σ_2 , причем $\sigma_1 > \sigma_2$, ($\sigma_1 = 0,005$, что составляет 1 % от среднего значения; $\sigma_2 = 0,0025$, что составляет 0,5 % от среднего значения). Для данных условий разность между СКО коэффициентов корреляции

составила 0,5 %. Анализ результатов моделирования показал, что максимально возможное значение отношения коэффициентов корреляции для данных условий составляет $\mu = 1,048 > 1$. Используя аналогичный подход для значений $K_1 = K_2 = 0,5$ ($\sigma_1 = 0,015$, $\sigma_2 = 0,005$), т. е. когда разность между СКО коэффициентов корреляции составляет 3 %, отношение $\mu = 1,126 > 1$. При $K_1 = K_2 = 0,5$ ($\sigma_1 = 0,025$, $\sigma_2 = 0,005$), т. е. когда разность между СКО коэффициентов корреляции составляет 5 % отношение $\mu = 1,197 > 1$ и т. д. Таким образом, можно сделать вывод, что увеличение разности между СКО (σ_1 и σ_2 при $\sigma_1 > \sigma_2$) коэффициентов корреляции (K_1 и K_2) способствует повышению их отношения μ , что, в свою очередь, будет повышать вероятность срыва.

Используя выражение (3), не трудно показать, что значительное увеличение разницы между σ_1 и σ_2 будет также уменьшать значение распределения Коши. Докажем это. Для простоты преобразований рассмотрим граничный случай срыва сопровождения, когда $K_1 = K_2$. Пусть $\sigma_1 \gg \sigma_2$. Тогда выражение (3) примет вид:

$$f\left(\frac{K_1}{K_2}\right) = \frac{\sigma_1 \cdot \sigma_2}{\pi \cdot \left(\sigma_1^2 + \sigma_2^2 \left(\frac{K_1}{K_2}\right)^2\right)} \approx \frac{\sigma_2}{\pi \cdot \sigma_1}. \quad (4)$$

Условие $\sigma_1 \gg \sigma_2$ говорит о том, что выражение (4) близко к нулю. Рассуждая аналогично, для $\sigma_1 \ll \sigma_2$ после преобразований получим, что плотность вероятности также будет стремиться к нулю:

$$f\left(\frac{K_1}{K_2}\right) \approx \frac{\sigma_1}{\pi \cdot \sigma_2}. \quad (5)$$

На третьем этапе согласно [6] было также смоделировано 1080 значений коэффициентов корреляции K_1 и K_2 со средним значением $K_{cp} = 0,5$ и с одинаковыми значениями σ_1 и σ_2 ($\sigma_1 = \sigma_2 = 0,0025$, что составляет 0,5 % от среднего значения). Анализ результатов моделирования показал, что максимально возможное значение отношения коэффициентов корреляции для данных условий составляет $\mu = 1,031 > 1$. Используя аналогичный подход, для значений $K_1 = K_2 = 0,5$ ($\sigma_1 = \sigma_2 = 0,005$, что составляет 1 % от среднего значения) отношение $\mu = 1,068 > 1$. При $K_1 = K_2 = 0,5$ ($\sigma_1 = \sigma_2 = 0,025$ что составляет 5 % от среднего значения), отношение $\mu = 1,374 > 1$ и т. д. Таким образом, можно сделать вывод, что при равенстве СКО ($\sigma_1 = \sigma_2$) коэффициентов корреляции их отношение также может превысить значение единицы ($\mu \geq 1$) и будет увеличиваться с увеличением $\sigma_1 = \sigma_2$. Это, в свою очередь, также будет способствовать повышению вероятности срыва.

Таким образом, проведенное моделирование показало, что срыв сопровождения, соответствующий $\mu \geq 1$ наступает даже при равенстве СКО ($\sigma_1 = \sigma_2$) коэффициентов корреляции K_1 и K_2 . Увеличение значений $\sigma_1 = \sigma_2$ способствует повышению соответствующего значения μ и повышает вероятность срыва. Увеличение разности между СКО σ_1 и σ_2 также способствует повышению значения μ и увеличению вероятности срыва. Поэтому в дальнейшем будем считать граничный случай $\sigma_1 = \sigma_2 \rightarrow \min$, $K_1 = K_2$ условием возникновения срыва сопровождения. В таком случае ($\sigma_1 = \sigma_2$) выражение для плотности вероятности частного двух случайных величин (3) примет вид

$$f(\mu) = \frac{1}{\pi \cdot (1 + (\mu)^2)}. \quad (6)$$

Тогда график плотности вероятности (6) будет иметь вид, представленный на рис. 3.

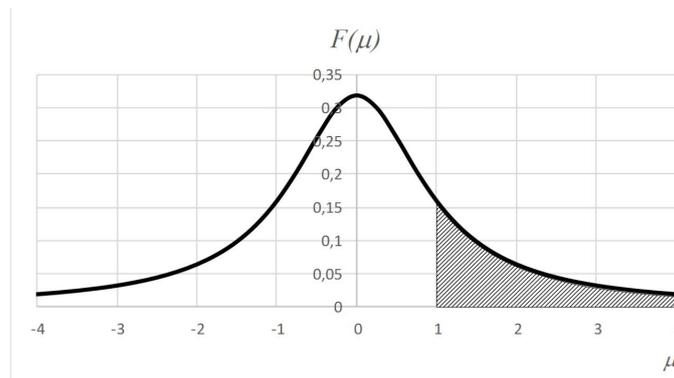


Рис. 3. Плотность вероятности случайной величины μ
Fig. 3. Probability density of a random variable μ

Функция распределения случайной величины μ будет вычисляться как интеграл от ее плотности распределения [4]:

$$F(\mu) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\mu) d\mu + C, \quad (7)$$

и иметь вид

$$F(\mu) = \frac{1}{\pi} \operatorname{arctg}(\mu) + 0,5. \quad (8)$$

Постоянная интегрирования $C = 0,5$ в выражении (8) обеспечивает свойство функции распределения $0 \leq F(\mu) \leq 1$, исходя из ее физического смысла, и полностью характеризует данную случайную величину с вероятностной точки зрения [7].

График функции распределения $F(\mu)$ представлен на рис. 4.

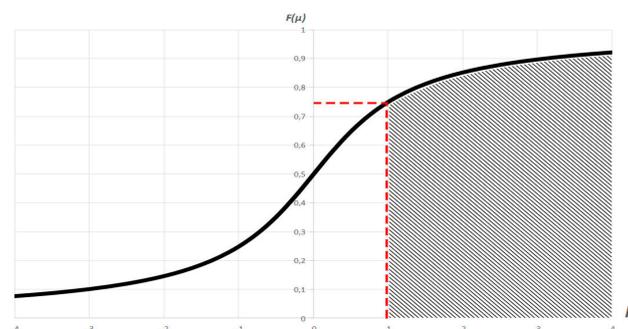


Рис. 4. Функция распределения случайной величины μ
Fig. 4. Random distribution function μ

Обсуждение результатов

Исходя из описанной выше ситуации (рис. 3, 4), срыв сопровождения наступит при выполнении условия $\mu \geq 1$. Увеличение значения $\mu \geq 1$, вызванное увеличением значения K_1 относительно K_2 либо увеличением разности между σ_1 и σ_2 способствует повышению вероятности срыва. На рис. 4 вероятность срыва находится в интервале $0,75 \leq P_{\text{ср}} \leq 1$, что соответствует заштрихованной области.

Вероятность устойчивого сопровождения объекта (отсутствие срывов) для рассматриваемого случая будет составлять полную группу событий с вероятностью срыва и определяться выражением:

$$P_{\text{сопр}} = 1 - P_{\text{ср}}, \quad (9)$$

и находится в интервале $0 \leq P_{\text{сопр}} \leq 0,25$.

Ввиду того, что в двухканальной оптико-электронной системе сопровождения видимый и инфракрасный (ИК) каналы работают в различных спектральных диапазонах, имеют различные параметры приемных устройств, различные по своей природе ЭИ и ТИ и др., то полученные с их выходов изображения будут иметь свои характеристики (математическое ожидание, СКО) во временной области. Однако условия возникновения срывов сопровождения у них будут идентичны рассмотренным ранее.

Принимая во внимание тот факт, что срывы сопровождения в каждом из каналов (видимом и ИК-диапазонах) являются независимыми событиями, то вероятность срыва в двухканальной оптико-электронной системе будет равна произведению вероятностей срыва в каждом канале. При $K_1 = K_2$, $\sigma_1 = \sigma_2 \rightarrow \min$ вероятность срыва в каждом канале будет находиться в интервале $0,75 \leq P_{\text{ср}}^{\text{ИК,ТВ}} \leq 1$. Тогда вероятность срыва при сопровождении двумя каналами будет составлять $(P_{\text{ср}}^{\text{ИК,ТВ}})^2$ и находиться в интервале $0,5625 \leq P_{\text{ср}}^{\text{КОМПЛ}} \leq 1$, т. е. уменьшится примерно в 1,3 раза.

Заключение

Таким образом, применение комплексирования в двухканальной оптико-электронной системе в условиях сложной фоновой обстановки и наличия преднамеренных помех, когда контраст объекта незначителен, будет способствовать снижению вероятности срыва и повышению устойчивости сопровождения. Приведенное в статье обоснование применения комплексирования можно распространить на системы, функционирующие в других спектральных диапазонах.

Список литературы

1. Хижняк А.В., Шарак Д.С., Мамченко А.С. К вопросу об обосновании применения комплексирования изображений для систем автоматического сопровождения в условиях сложного фона. *Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]*. 2019; 5. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/may19/2/text.pdf> DOI 10.30898/1684-1719.2019.5.2.
2. Bouwmans T., Porikli F., Hoferlin B., Vacavant A. *Background Modeling and Foreground Detection for Video Surveillance*. Chapman and Hall/CRC; 2014.
3. Wren C.R., Azarbayejani A., Doreel T., Pentland F. Real-time tracking of the human body. *IEEE Trans. On PAMI*. 1997; 19(7):780–785.
4. Вентцель Е. С. *Теория вероятностей*. 10-е изд. М.: Академия; 2005.
5. Тихонов В. И. *Статистическая радиотехника*. М.: Советское радио; 1966.
6. Косачев И.М., Ерошенко М.Г. Аналитическое моделирование стохастических систем. Мн.: Наука і тэхніка; 1993.
7. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. *Теория вероятностей и ее инженерные приложения*. 2-е изд. М.: Высш. шк.; 2000.
8. Заплатников С.С., Хижняк А.В., Шевяков А.В. Снижение вероятности срыва в корреляционных системах сопровождения оптически наблюдаемых объектов. *Проблемы физики, математики и техники*. 2015;1:98-104.

References

1. A.V. Khizhnyak, D.S. Sharak, A.S. Mamchenko. To the question of the rationale for the use of image complexing for automatic tracking systems in a complex background. *Zhurnal Radiojelektroniki [Jelektronnyj Zhurnal]=Journal of Radio Electronics [electronic journal]*. 2019; 5. Access mode: <http://jre.cplire.ru/jre/may19/2/text.pdf> DOI 10.30898 / 1684-1719.2019.5.2. (In Russ.)
2. Bouwmans T., Porikli F., Hoferlin B., Vacavant A. *Background Modeling and Foreground Detection for Video Surveillance*. Chapman and Hall/CRC; 2014.
3. Wren C.R., Azarbayejani A., Doreel T., Pentland F. Real-time tracking of the human body. *IEEE Trans. On PAMI*. 1997; 19(7):780–785.
4. Ventzel E.S. *Probability Theory*. 10th ed. M.: Academy; 2005. (In Russ.)

5. Tikhonov V.I. *Statistical Radio Engineering*. M.: Sovetskoe radio; 1966. (In Russ.)
6. Kosachev I.M., Eroshenkov M.G. *Analytical modeling of stochastic systems*. Minsk.: Navuka i tehnika; 1993. (In Russ.)
7. Wentzel E.S., Ovcharov L.A. *Probability Theory and its Engineering Applications*. 2nd ed. M.: vysshaja shkola; 2000. (In Russ.)
8. Zaplatnikov S.S., Khizhnyak A.V., Shevyakov A.V. Reducing the likelihood of disruption in correlation systems for tracking optically observable objects. *Problemy fiziki, matematiki i tehniki=Problems of Physics, Mathematics, and Technology*. 2015;1;98-104. (In Russ.)

Вклад автора

Используя математический аппарата теории случайных функций и имитационное моделирование, автор обосновал снижения вероятности срыва автоматического сопровождения при комплексировании исходных изображений видимого и инфракрасного диапазонов, когда контраст искомого объекта в обоих каналах незначителен.

Author contribution

Using the mathematical apparatus of the theory of random functions and simulation, the author substantiated the reduction in the likelihood of disruption of automatic tracking when combining the source images of the visible and infrared ranges, when the contrast of the desired object in both channels is negligible.

Сведения об авторах

Хижняк А.В., к.т.н., доцент, начальник кафедры автоматизированных систем управления войсками учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь».

Information about the authors

Khizhniak A.V., PhD, assistant of professor, head of Research Laboratory Automated Control System of Troops of Military Academy of the Republic of Belarus.

Адрес для корреспонденции

220057, Республика Беларусь,
г. Минск, пр. Независимости, д. 220,
Военная академия Республики Беларусь
тел. +375-29-364-41-90
e-mail: khizhniak_av@mail.ru
Хижняк Александр Вячеславович

Address for correspondence

220057, Republic of Belarus,
Minsk, Nezavisimosti av., 220,
Military Academy of the Republic of Belarus
tel. +375-29-364-41-90
e-mail: khizhniak_av@mail.ru
Khizhniak Aliaksandr Vyacheslavovich