

ISSN 1561-8358 (Print)
ISSN 2524-244X (Online)
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2023-68-2-167-176>
УДК 623.746.4-519 +533.6.013.622



Оригинальная статья

А. С. Солонар¹, С. В. Цуприк¹, П. А. Хмарский^{2*}

¹Военная академия Республики Беларусь,
пр. Независимости, 220, 220057, Минск, Республика Беларусь
²Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси,
ул. Академическая, 16, 220072, Минск, Республика Беларусь

ВЛИЯНИЕ СПОСОБА ФОРМИРОВАНИЯ ОПОРНОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ БОРТОВОЙ КОРРЕЛЯЦИОННО-ЭКСТРЕМАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ СОПРОВОЖДЕНИЯ НАЗЕМНЫХ ОБЪЕКТОВ

Аннотация. Для повышения эффективности бортовой корреляционно-экстремальной системы сопровождения при наличии изоморфных преобразований текущего изображения объекта (изменения уровня яркости, масштаба, сдвига и поворота изображения), а также помех естественного и искусственного происхождения в процессе наблюдения предлагается новый способ адаптивного формирования опорного изображения. Он заключается в применении многогипотезного измерителя с межобзорной памятью гипотез, в состав которого входят фильтры Калмана 0-го и 1-го порядка и фильтр Сингера 0-го порядка. Проводится сравнение предлагаемого способа адаптации с известными способами покáдровой смены и «экспоненциального сглаживания». Для проведения сопоставительного моделирования разработан комплекс математического моделирования, в котором использован имитатор входного воздействия на базе кроссплатформенной среды Unity3D, учитывающий кинематику движения наземных объектов и полета беспилотного летательного аппарата в нормальной системе координат. Эффективность сопровождения наземных объектов каждым из способов оценивалась по величине усредненного коэффициента проводки. Полученные результаты исследований могут быть использованы при разработке разведывательных БЛА, функционирующих в реальном масштабе времени.

Ключевые слова: корреляционно-экстремальная система, опорное изображение, полумарковская модель яркости, фильтр Калмана, многогипотезный измеритель с межобзорной памятью гипотез, беспилотный летательный аппарат (БЛА)

Благодарности. Работа выполнена при поддержке гранта Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект № Ф23М-103).

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация об авторах: Солонар Андрей Сергеевич – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры автоматизации, радиолокации и приемо-передающих устройств, Военная академия Республики Беларусь. E-mail: andssnew@yandex.ru; Цуприк Сергей Викторович – старший инженер учебной лаборатории кафедры автоматизации, радиолокации и приемо-передающих устройств, Военная академия Республики Беларусь. E-mail: Serhio.Observer@yandex.ru; Хмарский Петр Александрович* – кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси. <https://orcid.org/0000-0003-3404-3917>. E-mail: pierre2009@mail.ru

Вклад авторов: Солонар Андрей Сергеевич – обоснование концепции исследования, формулирование идеи, исследовательских целей и задач, разработка методологии и модели исследования; Цуприк Сергей Викторович – сбор и систематизация данных, компьютерное и математическое моделирование, проведение сравнительного анализа, написание текста рукописи; Хмарский Петр Александрович – обобщение и интерпретация результатов исследования, редактирование текста рукописи, работа с графическими материалами.

Для цитирования: Солонар, А. С. Влияние способа формирования опорного изображения на эффективность бортовой корреляционно-экстремальной системы сопровождения наземных объектов / А. С. Солонар, С. В. Цуприк, П. А. Хмарский // Вест. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2023. – Т. 68, № 2. – С. 167–176. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2023-68-2-167-176>

Поступила в редакцию: 15.05.2023

Утверждена к печати: 25.05.2023

*Original article*Andrei S. Solonar¹, Sergei V. Tsuprik¹, Petr. A. Khmarskiy^{2*}¹Military Academy of the Republic of Belarus, 220, Nezavisimosti Ave., 220057, Minsk, Republic of Belarus²Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus,
16, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus**INFLUENCE OF THE REFERENCE IMAGE FORMATION METHOD ON THE EFFICIENCY OF THE ONBOARD CORRELATION-EXTREME TRACKING SYSTEM FOR TRACKING GROUND OBJECTS**

Abstract. To improve the efficiency of the onboard correlation-extremal tracking system in the presence of isomorphic transformations of the current object image (changes in the brightness level, scale, shift and rotation of the image), as well as natural and artificial noise during the observation process, a new method of adaptive formation of the reference image is proposed. It consists in using an Interactive Multiple Model (IMM), which includes Kalman filters of the 0th and 1st order and a Singer filter of the 0th order. The proposed method of adaptation is compared with the known methods of frame-by-frame change and “exponential smoothing”. To carry out comparative modeling of a mathematical modeling complex, in which an input action simulator based on the Unity3D cross-platform environment was used, taking into account the kinematics of the movement of ground objects and the flight of an unmanned aerial vehicle in a natural coordinate system. The effectiveness of the evaluation of the tracking of ground objects of each of the evaluations was estimated by the value of the average coefficient of tracking. The obtained research results can be used in the development of reconnaissance UAVs operating in real time.

Keywords: correlation-extremal tracking system, reference image, semi-Markov model of brightness, Kalman filter, Interactive Multiple Model, unmanned aerial vehicle (UAV)

Acknowledgements. Research was carried out with the support of a grant from the Belarusian Republican Foundation for Basic Research (project No. F23M-103).

Conflict of interest: the authors declare that there is no conflict of interest.

Information about the authors: *Andrei S. Solonar* – Cand. Sci. (Engineering), Professor of the Department of Automation, Radar and Transceiver Devices, Military Academy of the Republic of Belarus. E-mail: andssnew@yandex.ru; *Sergey V. Tsuprik* – Senior Engineer of the Department of Automation, Radar and Transceiver Devices, Military Academy of the Republic of Belarus. E-mail: Serhio.Observer@yandex.ru; *Petr A. Khmarskiy** – Cand. Sci. (Engineering), Senior Researcher Scientist, Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus. <https://orcid.org/0000-0003-3404-3917>. E-mail: pierre2009@mail.ru

Contribution of the authors: *Andrei S. Solonar* – substantiation of the research concept, formulation of ideas, research goals and objectives, development of methodology and research model; *Sergey V. Tsuprik* – collection and systematization of data, computer and mathematical modeling, comparative analysis, writing the text of the manuscript; *Petr A. Khmarskiy* – generalization and interpretation of the results of the study, editing the text of the manuscript, working with graphic material.

For citation: Solonar A. S., Tsuprik S., Khmarskiy P. A. Influence of the reference image formation method on the efficiency of the onboard correlation-extreme tracking system for tracking ground objects. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2023, vol. 68, no. 2, pp. 167–176. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2023-68-2-167-176>

Received: 15.05.2023

Approved for printing: 25.05.2023

Введение. Развитие современных методов обработки изображений [1–6] получило широкое применение при создании высокоточных систем наведения беспилотных летательных аппаратов (БЛА). Особый интерес представляют бортовые корреляционно-экстремальные системы (КЭС) сопровождения, которые обеспечивают решение задач однократного внутрикадрового обнаружения, поиска, распознавания, а также последовательного межкадрового автоматического сопровождения неподвижных и движущихся наземных объектов на фоне поверхности земли [7–10]. Принцип работы КЭС заключается в поиске максимума взаимной корреляционной функции (КФ) двух изображений – наблюдаемого объекта и опорного. Как правило, опорное изображение формируется оператором в момент выдачи целеуказания либо известно заранее. Однако наличие изоморфных преобразований текущего изображения объекта (изменения уровня яркости, масштаба, сдвига и поворота изображения относительно ориентации БЛА) и помех естественного и искусственного происхождения требует адаптивного формирования опорного изображения в процессе наблюдения [11].

Существует несколько способов адаптации опорного изображения [12]. Простейшим из них является покадровая смена. Между тем непосредственное использование изображения объекта неэффективно и приводит к быстрому накоплению ошибок измерения координат и искажению опорного изображения. Данная проблема подробно описана в [12], а в качестве решения предлагается применить для каждого пикселя процедуру «экспоненциального сглаживания».

Но данная процедура при наблюдении высокоманевренных объектов недостаточно эффективна, что также может приводить к срыву сопровождения. Поэтому для адаптивного формирования опорного изображения предложен новый способ, заключающийся в применении многогипотезного измерителя с межобзорной памятью гипотез (МИМППГ) [13–16], в состав которого входят фильтры Калмана 0-го и 1-го порядка и фильтр Сингера 0-го порядка. Статистический синтез МИМППГ проведен на основе полумарковской модели яркости, описанной в [17, 18].

Для оценки влияния способа адаптации опорного изображения на эффективность сопровождения КЭС требуется провести сопоставительное моделирование. Сравнить их эффективность и оценить качество сопровождения наземных объектов на фоне поверхности земли.

Таким образом, *цель исследования* – оценка эффективности КЭС сопровождения в зависимости от способа адаптации опорного изображения. Для этого необходимо провести сравнительный анализ точности определения координат для различных способов адаптации опорного изображения методами математического моделирования и полунатурных испытаний.

Комплекс математического моделирования. Степень влияние способа адаптации опорного изображения на эффективность КЭС оценивалась при помощи специального комплекса математического моделирования. Он включает в себя три основных элемента: имитатор входного воздействия, КЭС и блок пересчета координат. Структурная схема комплекса моделирования приведена на рис. 1. Имитатор входного воздействия представляет собой отдельный программный модуль, разработанный на базе кроссплатформенной среды Unity3D. Эта визуальная среда проектирования позволяет относительно просто и с высокой степенью адекватности формировать трехмерные сцены и их анимацию [19].

Имитатор включает в себя четыре основных блока. Модель окружающей среды задает условия наблюдения, уровень освещения и погодные условия, вид ландшафта, природное окружение и другие элементы. Имитация движения наземных объектов в сцене по заданной траектории осуществляется моделью наземного объекта, а полет БЛА – моделью летательного аппарата.

Модель камеры в сцене представляет собой отдельный элемент и определяет область в трехмерном пространстве, которая отображается в кадре. Перемещение камеры в пространстве определяется положением и ориентацией БЛА. В результате с блока формирования изображения последовательно во времени поступают синтезированные кадры $\mathbf{f}_{k+1}^{(c)}$, которые подаются на вход устройства корреляционно-экстремальной обработки в качестве входного воздействия.

Одновременно с изображением $\mathbf{f}_{k+1}^{(c)}$ подается опорное изображение. На начальном этапе опорное изображение $\Theta_{опk=0}^{(c)}$ формируется в момент выдачи целеуказания для сопровождения объекта. Далее рассчитывается взаимная корреляционная матрица $\mathbf{F}_{(k+1)i^*j^*}^{(c)}$ входного изображения $\mathbf{f}_{k+1}^{(c)}$ и опорного $\Theta_{опk+0}^{(c)}$, устанавливающая меру их близости. Номера элементов i^*j^* матрицы $\mathbf{F}_{(k+1)i^*j^*}^{(c)}$, в которых достигается глобальный максимум, определяют координаты объекта на изображении $\mathbf{f}_{k+1}^{(c)}$. Поиск глобального максимума $(i^*j^*) = \arg \max \left\{ \mathbf{F}_{(k+1)i^*j^*}^{(c)} \right\}$ осуществляется в блоке вычисле-

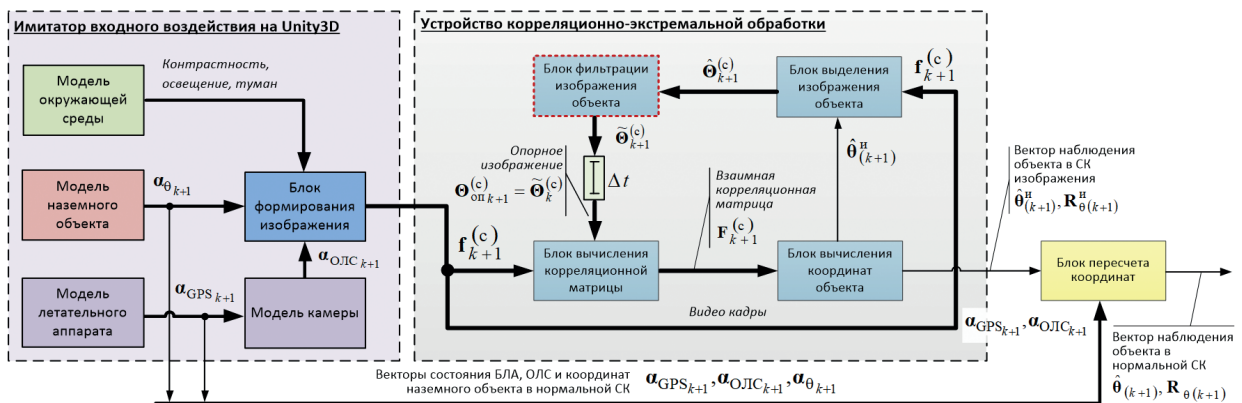


Рис. 1. Структурная схема комплекса моделирования на базе кроссплатформенного графического движка Unity3D

Fig. 1. Structural diagram of the modeling complex based on the Unity3D cross-platform graphics engine

ния координат объекта и выдается на выход в виде оценки вектора наблюдения $\hat{\theta}_{(k+1)}^n$ и корреляционной матрицы ошибок разового оценивания $\mathbf{R}_{\theta_{(k+1)}^n}$.

В состав вектора наблюдения $\hat{\theta}_{(k+1)}^n$ входят экранные координаты наблюдаемого объекта и его линейные размеры. По этим данным на входном изображении $\mathbf{f}_{k+1}^{(c)}$ выделяется область, принадлежащая изображению объекта $\hat{\Theta}_{(k+1)}^{(c)}$. Далее изображение объекта поступает на вход блока фильтрации, где формируется фильтрованное изображение $\hat{\Theta}_{(k+1)}^{(c)}$. В итоге полученное изображение объекта $\hat{\Theta}_{(k+1)}^{(c)}$ проходит через линию задержки на величину интервала обновления кадров Δt и используется в качестве опорного изображения на следующий кадр. В результате вектор наблюдения экранных координат $\hat{\theta}_{(k+1)}^n$ и ошибки РО $\mathbf{R}_{\theta_{(k+1)}^n}$ пересчитываются в прямоугольную систему в соответствии с разработанной в [20] методикой. Для выполнения данной операции на вход блока пересчета координат с имитатора входного воздействия дополнительно поступают истинные значения вектора состояния ориентации оптико-локационной системы (ОЛС) $\mathbf{a}_{\text{ОЛС}k+1}$, БЛА $\mathbf{a}_{\text{инс.}k+1}$ (углы ориентации и скорости их изменений в связанной СК) и $\mathbf{a}_{\text{GPS } k+1}$ (прямоугольные координаты и скорости их изменений в нормальной СК) в момент времени t_{k+1} .

Результаты математического моделирования. Для проведения математического моделирования сформированы типовые входные воздействия при помощи имитатора на Unity3D. В качестве типовых воздействий представлены синтезированные видеозаписи, на которых изображены различные автомобили, движущиеся на фоне дорожного покрытия. Входные воздействия отличаются между собой вариантами движения автомобиля: по прямой, повороты, разворот на 180° и круговое движение. По каждому из типовых сценариев проверялась эффективность сопровождения при помощи обобщенного системного показателя, определяемого экспериментально, – коэффициента проводки K_{Π} и его среднего значения \bar{K}_{Π} [22]:

$$K_{\Pi} = \frac{t_{\Sigma\theta}}{t_{\Sigma}} = \frac{N_{\Sigma\theta}}{N_{\Sigma}}, \quad \bar{K}_{\Pi} = \frac{1}{N_{\text{эксп}}} \sum_{k=1}^{N_{\text{эксп}}} K_{\Pi}(k), \quad (1)$$

где $t_{\Sigma\theta}$ – суммарное фактическое время сопровождения наземного объекта; t_{Σ} – общее время наблюдения наземного объекта; $N_{\Sigma\theta}$ – суммарное число кадров сопровождения наземного объекта; N_{Σ} – суммарное число кадров, в которых наблюдался наземный объект; $N_{\text{эксп}}$ – общее число модельных экспериментов.

На рис. 2 представлены результаты моделирования для первого типового воздействия.

Фон имеет сложную структуру, поскольку включает в себя различные элементы, такие как дорогу, растительность, деревья (см. рис. 2, *a*). Длительность входного воздействия составляет 1000 кадров. Размер строка изображения объекта – 32×32 пикселя. Моделирование осуществляется на всем интервале наблюдения. При моделировании проводилось $N_{\text{эксп}} = 10000$ модельных экспериментов для каждого типового сценария, что с запасом удовлетворяет доверительной вероятности 0,95. На рис. 2, *b* изображена истинная траектория движения автомобиля в нормальной прямоугольной системе координат x (север), y (высота), z (восток), а также результаты оценивания координат для трех способов адаптации опорного изображения. В отсутствие динамики при движении автомобиля все способы адаптации показывают хороший результат. Так, на рис. 2, *c* приведены расчеты среднего значения коэффициента проводки \bar{K}_{Π} . При покадровой смене опорного изображения среднее значение коэффициента проводки составило $\bar{K}_{\Pi} = 0,72$ ввиду медленного накопления ошибок измерения координат за счет влияния флуктуационных ошибок яркости наблюдаемого изображения. Для экспоненциального сглаживания коэффициент проводки составил $\bar{K}_{\Pi} = 0,83$, а для ИММ-измерителя $\bar{K}_{\Pi} = 0,98$.

Результаты моделирования для второго типового воздействия представлены на рис. 3, на котором изображен легковой автомобиль, осуществляющий движение по прямой с поворотами. В данном случае оценивалась устойчивость сопровождения при совершении маневра в виде поворота на 90° .

Как видно из рис. 3, *b*, при покадровой смене опорного изображения срыв сопровождения наступает на первом же повороте автомобиля, что свидетельствует о низкой эффективности данного способа при наличии маневра. При экспоненциальном сглаживании, по сравнению с покадровой сменой, время устойчивого сопровождения значительно возрастает, но с увеличением времени наблюдения вероятность срыва остается достаточно высокой. Применение

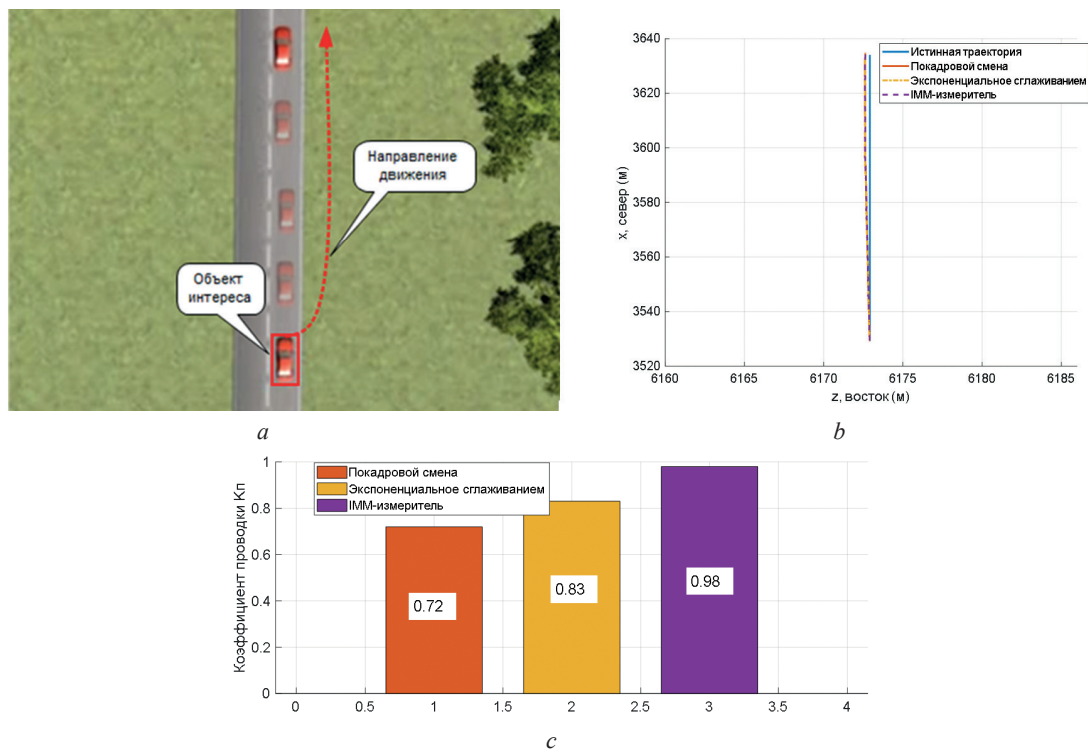


Рис. 2. Результаты математического моделирования для прямолинейного движения наземного объекта: *a* – условия наблюдения; *b* – результаты сопровождения наземного объекта; *c* – диаграмма средних значений коэффициента проводки

Fig. 2. Results of mathematical modeling for rectilinear motion of a ground object: *a* – observation conditions; *b* – ground object tracking results; *c* – average tracking ratio chart

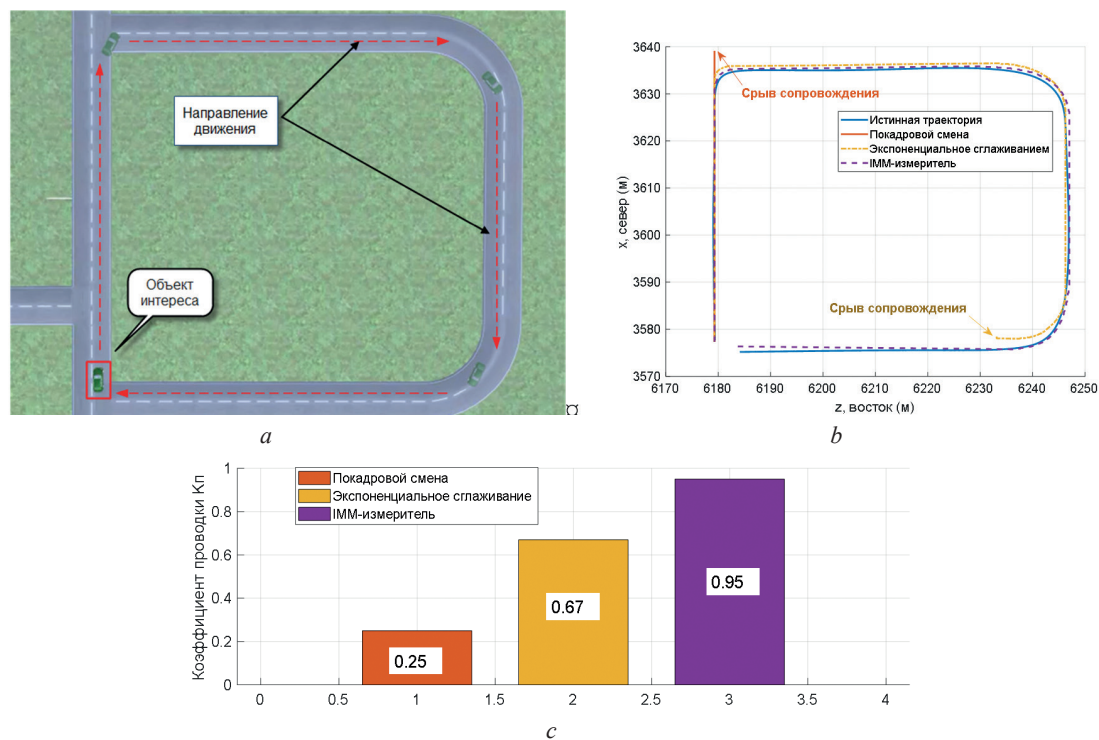


Рис. 3. Результаты математического моделирования для прямолинейного движения наземного объекта с поворотами: *a* – условия наблюдения; *b* – результаты сопровождения наземного объекта; *c* – диаграмма средних значений коэффициента проводки

Fig. 3. Results of mathematical modeling for rectilinear motion of a ground object with turns: *a* – observation conditions; *b* – ground object tracking results; *c* – average tracking ratio chart

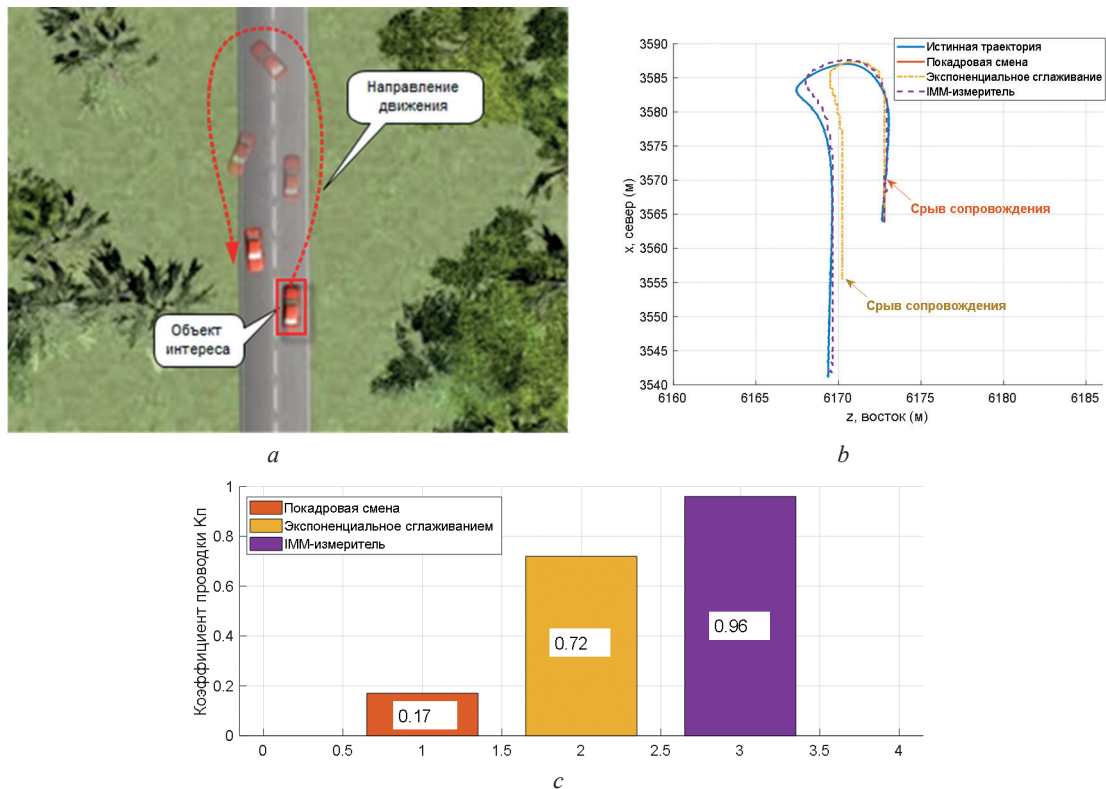


Рис. 4. Результаты математического моделирования для движения наземного объекта с разворотом на 180° : a – условия наблюдения; b – результаты сопровождения наземного объекта; c – диаграмма средних значений коэффициента проводки

Fig. 4. The results of mathematical modeling for the movement of a ground object with a turn of 180° : a – observation conditions; b – ground object tracking results; c – average tracking ratio chart

ИММ-измерителя позволило устойчиво сопровождать объект для данного типового воздействия на всем интервале наблюдения. Так, на рис. 3, c приведены расчеты среднего значения коэффициента проводки \bar{K}_n . При покадровой смене опорного изображения среднее значение коэффициента проводки составило $\bar{K}_n = 0,25$ по причине медленного накопления ошибок измерения координат за счет влияния флуктуационных ошибок яркости наблюдаемого изображения. Для экспоненциального сглаживания коэффициент проводки составил $\bar{K}_n = 0,67$, а для ИММ-измерителя $\bar{K}_n = 0,95$.

На рис. 4 представлены результаты моделирования для третьего типового воздействия, где изображен легковой автомобиль, который совершает разворот на 180° . Оценивается устойчивость сопровождения при совершении маневра в виде резкого разворота. Из рис. 4, b видно, что в случае полного разворота, как и для поворота на 90° , способ покадровой смены опорного изображения демонстрирует наихудший результат. Срыв произошел на ранних этапах маневра, а среднее значение коэффициента проводки составило $\bar{K}_n = 0,17$ (см. рис. 4, c).

Анализ проведенного математического моделирования показал, что лучший результат сопровождения по сравнению с покадровой сменой демонстрирует алгоритм корреляционно-экстремальной обработки при адаптации опорного изображения способом экспоненциального сглаживания. Полученная в результате траектория движения объекта близка к истинной. Однако после совершения маневра также наблюдается срыв сопровождения, а значение среднего коэффициента проводки равно $\bar{K}_n = 0,72$ (см. рис. 4, c). Наилучший результат показывает способ адаптации с применением ИММ-измерителя. Результаты РО координат близки к истинным значениям на всем интервале наблюдения, а величина среднего коэффициента проводки составила $\bar{K}_n = 0,96$ (см. рис. 4, c).

Таким образом, способ адаптации опорного изображения, основанный на применении МИМППГ, позволяет добиться значений коэффициента проводки $0,94$ – $0,98$, что в $1,36$ – $5,64$ раза больше, чем для способа покадровой смены, и в $1,18$ – $1,42$ раза больше, чем для способа экспоненциального сглаживания.

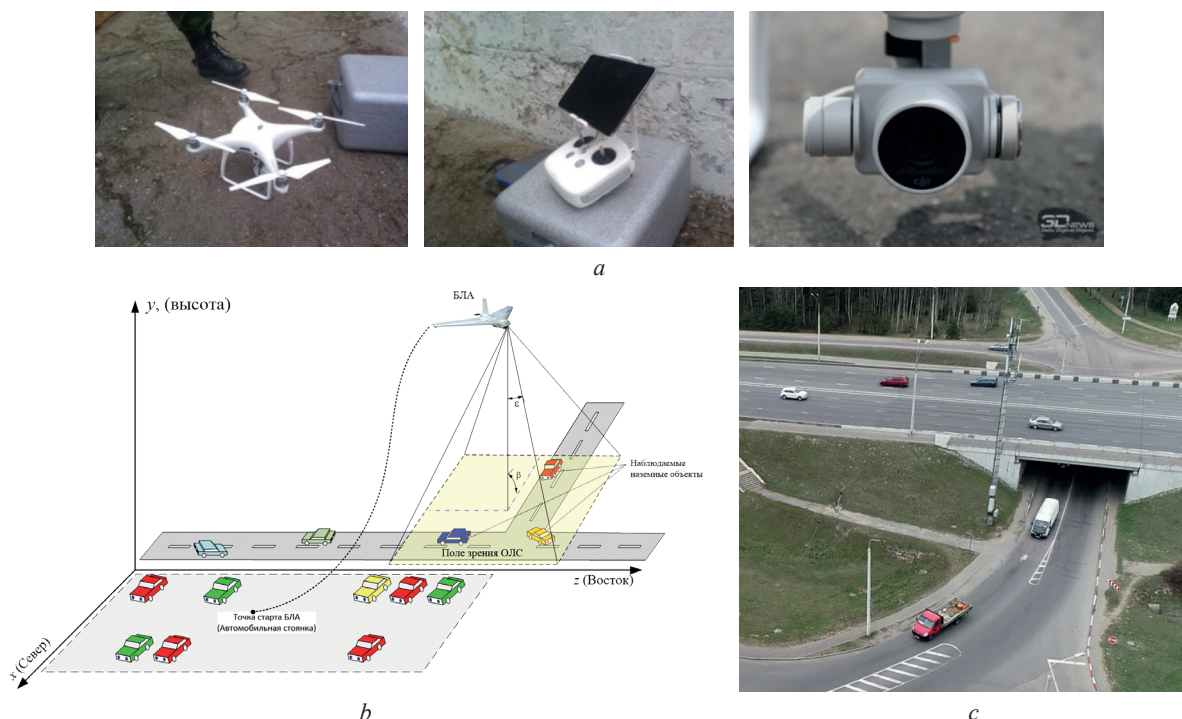


Рис. 5. Условия проведения полунатурных испытаний: *a* – внешний вид использованной для формирования видеозаписей аппаратуры; *b* – обобщенная схема; *c* – условия наблюдения

Fig. 5. Conditions for conducting semi-natural tests: *a* – appearance of the equipment used for the formation of video recordings; *b* – generalized scheme; *c* – observation conditions

Результаты полунатурных испытаний. В качестве аппаратуры для формирования видеозаписей использовался БЛА DJI Phantom 4, внешний вид и органы управления которого представлены на рис. 5, *a*.

Видеозаписи наземной фоно-целевой обстановки формировались по результатам съемки с Phantom 4 на различных участках движения. В кадре наблюдались легковые и грузовые автомобили, движущиеся на фоне дорожного покрытия. Ориентация оптической оси камеры Phantom 4 изменялась в процессе наблюдения при смене участка обзора. Средняя продолжительность нахождения каждого отдельно взятого объекта в среднем составляла 3–8 с.

Испытания проводились по схеме, приведенной на рис. 5, *b*, в следующей последовательности:

1. Старт БЛА. Подъем на фиксированную высоту (до 50 м).
2. Съемка участка местности для различных положений камеры и ориентации БЛА в течение 2–8 мин. Средняя продолжительность БЛА в воздухе – 20 мин.
3. Возврат БЛА в точку старта. Замена АКБ и повторный старт.

Всего БЛА поднимался в воздух 3 раза. В результате были получены видеозаписи наземной фоно-целевой обстановки средней продолжительностью 2–8 мин. Одновременно с формированием видео записывались данные координат и ориентации БЛА, а также положение и углы пространственной ориентации камеры в процессе полета. Полученная телеметрия использовалась для пересчета экранных координат наблюдаемых объектов в прямоугольную. Обработка полученных записей осуществлялась в лабораторных условиях. Всего обработано более 200 записей для различных наземных объектов. Результаты обработки некоторых из них представлены в таблице.

Результаты полунатурных испытаний показали, что использование МИМПГ для адаптации опорного изображения к изменяющейся яркости изображения объекта позволяет повысить коэффициент проводки до 0,91–0,98, что в 1,32–3,72 раза больше, чем для способа покадровой смены, и в 1,14–1,47 раза больше, чем для способа экспоненциального сглаживания. Полученные значения коэффициента проводки согласуются с результатами математического моделирования.

Результаты обработки полунатурных испытаний
Processing results of semi-natural tests

Описание сценария		Коэффициент проводки K_p		
		Покадровая смена	Экспоненциальное сглаживание	Многогипотезный измеритель
Объект интереса – <i>грейдер</i> . Двигается прямо с поворотом на 90°. Число кадров – 450		$\frac{0,26}{3,5}$ *	$\frac{0,62}{1,47}$	0,91
Объект интереса – <i>грузовик</i> . Двигается прямо, слева на право (в кадре) не маневрирует. Число кадров – 300		$\frac{0,74}{1,32}$	$\frac{0,86}{1,14}$	0,98
Объект интереса – <i>черный легковой автомобиль</i> . Двигается прямо. Меняется ракурс наблюдения и масштаб. Число кадров – 650		$\frac{0,31}{2,97}$	$\frac{0,68}{1,35}$	0,92
Объект интереса – <i>белый легковой автомобиль</i> . Двигается прямо по дороге. Меняется ракурс наблюдения и масштаб. Число кадров – 300		$\frac{0,34}{2,82}$	$\frac{0,71}{1,35}$	0,96
Объект интереса – <i>грузовик</i> . Двигается прямо с поворотом на перекрестке. Число кадров – 500		$\frac{0,37}{2,47}$	$\frac{0,73}{1,26}$	0,92
Объект интереса – <i>красный автомобиль</i> . Двигается прямо. Меняется ракурс наблюдения и масштаб. Число кадров – 650		$\frac{0,25}{3,72}$	$\frac{0,75}{1,24}$	0,93

*Здесь и далее в таблице в числителе приводится значение коэффициента проводки для данного способа адаптации, в знаменателе – величина выигрыша относительно многогипотезного измерителя.

Заключение. Представлены основные результаты сравнения нового способа адаптации опорного изображения, основанного на применении многогипотезного измерителя яркости. Сравнение осуществлялось с наиболее известными и используемыми способами покадровой смены и экспоненциального сглаживания. Для сравнения был разработан комплекс моделирования, в состав которого входит имитатор входного воздействия, на базе кроссплатформенной среды Unity3D, учитывающей кинематику движения наземных объектов и полета БЛА.

В результате математического моделирования установлено, что способ адаптации опорного изображения, основанный на применении МИМППГ, позволяет добиться значений коэффициента проводки 0,94–0,98, что в 1,36–5,64 раза больше, чем для способа покадровой смены, и в 1,18–1,42 раза больше, чем для способа экспоненциального сглаживания.

Полученные результаты математического моделирования подтверждены полунатурными испытаниями, проведенными с использованием квадрокоптера DJI Phantom 4. Это позволило проверить адекватность разработанной математической модели и подтвердить необходимость практического использования для адаптации опорного изображения к изменяющейся яркости изображения объекта нового способа, основанного на применении МИМППГ.

Результаты полунатурных испытаний показали, что использование МИМППГ для адаптации опорного изображения к изменяющейся яркости изображения объекта позволяет повысить коэффициент проводки до 0,91–0,98, что в 1,32–3,72 раза больше, чем для способа покадровой смены, и в 1,14–1,47 раза больше, чем для способа экспоненциального сглаживания.

Результаты исследований могут быть использованы научно-техническими организациями и предприятиями при разработке устройств обработки информации бортовых оптико-локационных систем для повышения точности выдаваемых координат неподвижных и движущихся одиночных и групповых наземных объектов на фоне поверхности земли. Полученные технические решения будут полезны в сферах, где применяются беспилотные летательные аппараты: рекогносцировка местности, мониторинг окружающей среды, точное земледелие, обеспечение безопасности охраняемых объектов, патрулирование границ, контроль дорожного движения, оказание помощи при чрезвычайных ситуациях и пр.

Список использованных источников

1. Али, Б. Алгоритмы навигации БПЛА с использованием систем технического зрения / Б. Али, Р. Н. Садеков, В. В. Цодокова // *Гироскопия и навигация*. – 2022. – Т. 30, № 4. – С. 87–105.
2. Артемьев, В. М. Обработка изображений в пассивных обзорно-поисковых оптико-электронных системах / В. М. Артемьев, А. О. Наумов, Л. Л. Кохан ; Нац. Акад. наук Беларуси, Ин-т приклад. физики. – Минск: Беларус. навука, 2014. – 116 с.
3. Артемьев, В. М. Обнаружение точечных объектов на изображениях в условиях неопределенности / В. М. Артемьев, А. О. Наумов, Л. Л. Кохан // *Информатика*. – 2010. – № 2. – С. 15–24.
4. Артемьев, В. М. Обнаружение объектов конечных размеров на изображениях в условиях неопределенности / В. М. Артемьев, А. О. Наумов, Л. Л. Кохан // *Информатика*. – 2010. – № 4. – С. 5–15.
5. Артемьев, В. М. Нелинейная фильтрация случайных последовательностей расширенным методом наименьших квадратов / В. М. Артемьев, А. О. Наумов, Л. Л. Кохан // *Информатика*. – 2018. – Т. 15, № 1. – С. 60–69.
6. Mueller, K. Combination of Wide Baseline Image Matching and Tracking for Autonomous UAV Approaches to a Window / K. Mueller, J. Atman, G. F. Trommer // *Gyroscopy Navig.* – 2019. – № 10. – P. 206–215. <https://doi.org/10.1134/S2075108719040138>.
7. Баклицкий, В. К. Корреляционно-экстремальные методы навигации и наведения / В. К. Баклицкий. – Тверь: Книж. клуб, 2009. – 360 с.
8. Автоматическое обнаружение и сопровождение динамических объектов на изображениях, формируемых оптико-электронными приборами в условиях априорной неопределенности. Методы и алгоритмы / О. Б. Гузенко [и др.]. – М.: Радиотехника, 2015. – 280 с.
9. Федосеев, В. И. Оптико-электронные приборы ориентации и навигации космических аппаратов / В. И. Федосеев, М. П. Колосов. – М.: Логос, 2007. – 248 с.
10. Оптико-локационный координатор системы самонаведения беспилотного летательного аппарата / А. С. Солонар [и др.] // *Докл. БГУИР*. – 2018. – № 3. – С. 19–25.
11. Красильщиков, М. Н. Управление и наведение беспилотных маневренных летательных аппаратов на основе современных информационных технологий / М. Н. Красильщиков, Г. Г. Серебряков. – М.: Физматлит, 2003. – 280 с.
12. Системы автоматического обнаружения и сопровождения объектов. Обработка изображений и управление / Б. А. Алпатов [и др.]. – М.: Радиотехника, 2008. – 176 с.
13. Bar-Shalom, Y. Estimation with Applications to Tracking and Navigation: Theory, Algorithms, and Software / Y. Bar-Shalom, X. R. Li, T. Kirubarajan. – New York: Wiley, 2001. – 558 p. <https://doi.org/10.1002/0471221279>
14. Optical Aircraft Positioning for Monitoring of the Integrated Navigation System during Landing Approach / P. Hecker [et al.] // *Gyroscopy Navig.* – 2019. – Iss. 10. – P. 216–230. <https://doi.org/10.1134/S2075108719040084>
15. Li, X. R. Survey of maneuvering target tracing. Part I: Dynamic models / X. R. Li, V. P. Jilkov // *IEEE Trans. Aerospace Electronic Syst.* – 2003. – Vol. 39, № 4. – P. 1333–1364. <https://doi.org/10.1109/TAES.2003.1261132>
16. Solonar A. S. Main problems of trajectory processing and approaches to their solution within the framework of multitarget tracking / A. S. Solonar, P.A. Khmarski // *J. Phys.: Conf. Ser.* – 2021. – Vol. 1864. – Art. ID 012004. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1864/1/012004>
17. Цуприк, С. В. Методика исследования статистических свойств яркости пикселей изображений оптико-локационной системы беспилотного летательного аппарата / С. В. Цуприк, А. С. Солонар // *Информационные радиосистемы и радиотехнологии: материалы Респ. науч.-техн. конф., Минск, 29–30 нояб. 2022 г.* – Минск: БГУИР, 2022. – С. 193–197.
18. Полумарковская модель изменения яркости изображения наземного объекта, формируемого оптико-локационной системой / А. С. Солонар [и др.] // *Вест. Воен. акад. Респ. Беларусь*. – 2023. – № 1. – С. 97–107.
19. Features of trajectory measurement coordinates and parameters of movement of ground objects in on-board optical-location systems / A. S. Solonar [et al.] // *25th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS)*, 28–30 May 2018. – St. Petersburg, 2018. – P. 1–5. <https://doi.org/10.23919/ICINS.2018.8405853>
20. Методика расчета ошибок разового оценивания местоположения наблюдаемых объектов в бортовых оптико-локационных системах / А. С. Солонар [и др.] // *Докл. БГУИР*. – 2014. – № 7 (85). – С. 71–77.

21. Solonar, A. S. General construction principles and performance features of trajectory processing by data from one radar data source / A. S. Solonar, P.A. Khmarski // *J. Phys.: Conf. Ser.* – 2021. – Vol. 1864. – Art. ID 012138. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1864/1/012138>

References

1. Ali B., Sadekov R. N., Tsodokova, V. V. A Review of Navigation Algorithms for Unmanned Aerial Vehicles Based on Computer Vision Systems. *Gyroscopy and Navigation*, 2022, vol. 30, no. 4, pp. 241–252. <https://doi.org/10.1134/S2075108722040022>
2. Artemiev V. M., Naumov A. O., Kohan L. L. *Image Processing in Passive Survey and Search Optoelectronic Systems*. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2014. 116 p. (in Russian).
3. Artemiev V. M., Naumov A. O., Kohan L. L. Point objects detection in the case of uncertainty. *Informatika = Informatics*, 2010, no. 2, pp. 15–24 (in Russian).
4. Artemiev V. M., Naumov A. O., Kohan L. L. Limited-size object detection on images under condition of uncertainty. *Informatika = Informatics*, 2010, no. 4, pp. 5–15 (in Russian).
5. Artemiev V. M., Naumov A. O., Kohan L. L. nonlinear Filtering of a Random Sequences with Extended Least-Square Method. *Informatika = Informatics*, 2018, vol. 15, no. 1, pp. 60–69 (in Russian).
6. Mueller K., Atman, J., Trommer, G. F. Combination of Wide Baseline Image Matching and Tracking for Autonomous UAV Approaches to a Window. *Gyroscopy and Navigation*, 2019, no. 10, pp. 206–215. <https://doi.org/10.1134/S2075108719040138>
7. Baklickij V. K. *Correlation-Extreme Methods of Navigation and Guidance*. Tver', Knizhnyi klub Publ., 2009. 360 p. (in Russian).
8. Guzenko O. B., Katulev A. N., Khramichev A. A., Yagol'nikov S. V. *Automatic Detection and Tracking of Dynamic Objects in Images Generated by Optoelectronic Devices under Conditions of a Priori Uncertainty. Methods and Algorithms*. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2015. 280 p. (in Russian).
9. Fedoseev V. I., Kolosov M. P. *Optoelectronic Devices for Orientation and Navigation of Spacecraft*. Moscow, Logos Publ., 2007. 248 p. (in Russian).
10. Solonar A. S., Khmarski P. A., Mihalkovki A. A., Tsuprik S. V., Ivanuk V. S. Optical-location coordinator of the unmanned aerial vehicle homing system. *Doklady BGUIR*, 2018, no. 3, pp. 19–25 (in Russian).
11. Krasil'shchikov M. N., Serebryakov G. G. *Control and Guidance of Unmanned Maneuverable Aircraft Based on Modern Information Technologies*. Moscow, Fizmatlit Publ., 2003. 280 p. (in Russian).
12. Alpatov B. A., Babayan P., Balashov O. E., Stepashkin A. I. *Automatic Object Detection and Tracking Systems. Image Processing and Management*. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2008. 176 p. (in Russian).
13. Bar-Shalom Y., Li X. R., Kirubarajan T. *Estimation with Applications to Tracking and Navigation: Theory, Algorithms, and Software*. New York, Wiley, 2001. 558 p. <https://doi.org/10.1002/0471221279>
14. Hecker P., Angermann M., Bestmann U., Dekiert A., Wolkow S. Optical Aircraft Positioning for Monitoring of the Integrated Navigation System during Landing Approach. *Gyroscopy and Navigation*, 2019, iss. 10, pp. 216–230. <https://doi.org/10.1134/S2075108719040084>
15. Li X. R., Jilkov V. P. Survey of maneuvering target tracing. Part I: Dynamic models. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2003, vol. 39, no. 4, pp. 1333–1364. <https://doi.org/10.1109/TAES.2003.1261132>
16. Solonar A. S., Khmarski P. A. Main problems of trajectory processing and approaches to their solution within the framework of multitarget tracking. *Journal of Physics: Conference Series (JPCS)*, 2021, vol. 1864, art. ID 012004. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1864/1/012004>
17. Cuprik S. V., Solonar A. S. Methodology for the study of statistical properties of pixel brightness of images of the optical-location system of an unmanned aerial vehicle. *Informatsionnye radiosistemy i radiotekhnologii: Materialy Respublikanskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii, Minsk, 29–30 noyabrya 2022 g.* [Information Radio Systems and Radio Technologies: Materials of the Republican Scientific and Technical Conference, Minsk, November 29–30, 2022]. Minsk, BSUIR, 2022, pp. 193–197 (in Russian).
18. Solonar A. S., Khmarski P. A., Mihalkovkii A. A., Tsuprik S. V. Semi-Markov model of changing the brightness of the image of a ground object formed by an optical-location system. *Vestnik Voennoi akademii Respubliki Belarus'* [Bulletin of the Military Academy of the Republic of Belarus], 2023, no. 1, pp. 97–107 (in Russian).
19. Solonar A. S., Khmarskiy P. A., Mihalkovskiy A. A., Tsuprik S. V. Features of trajectory measurement coordinates and parameters of movement of ground objects in on-board optical-location systems. *25th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS), 28–30 May 2018*. St. Petersburg, 2018, pp. 1–5. <https://doi.org/10.23919/ICINS.2018.8405853>
20. Solonar A. S., Khmarski P. A., Mihalkovkii A. A., Tsuprik S. V. Methodology for calculating of the different estimation errors of observed objects location in the airborne optical-location systems. *Doklady BGUIR*, 2014, no. 7 (85), pp. 71–77 (in Russian).
21. Solonar A. S., Khmarski P. A. General construction principles and performance features of trajectory processing by data from one radar data source. *Journal of Physics: Conference Series (JPCS)*, 2021, vol. 1864, art. ID 012138, 10 p. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1864/1/012138>