

Исследование характеристик алгоритма корреляционно-экстремальной навигации для летательного аппарата

© Е.Д. Белозёрова

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Рассмотрен предназначенный для авиационного комплекса алгоритм корреляционно-экстремальной системы навигации и наведения летательного аппарата. Этот алгоритм обеспечивает дальнейшее радиообнаружение объектов противника, а также наведение на них средств поражения и перехвата. Приведена классификация методов корреляционно-экстремальной навигации, и каждый из методов представлен в отдельности. На примере найденного с воздуха аэродрома определена ошибка между текущим и эталонным изображениями как расстояние между двумя точками в системе координат пикселей исходного изображения. Отмечено, что при движении объект может быть искажен геометрическими, яркостными и шумовыми преобразованиями. С помощью найденного изображения исследованы зависимости ошибки от изменения яркости, угла поворота и уровня шума фрагмента изображения, а также от выбранного элемента навигации. Полученные результаты приведены в виде графиков. Показано, что метод фазовой корреляции более устойчив к яркостным и шумовым искажениям фрагмента изображения, а метод градиентной корреляции более устойчив к геометрическим преобразованиям. Получено, что навигация разнородных и многообразных элементов (города) происходит лучше, чем однообразных и однородных (дороги и леса).

Ключевые слова: корреляционно-экстремальные системы навигации и наведения, фазовая корреляция, градиентная корреляция, классический корреляционный алгоритм

Введение. Корреляционно-экстремальные системы навигации и наведения (КЭСН) [1] — наиболее распространенные системы автоматического управления движущимися объектами, в первую очередь летательными аппаратами (ЛА). Когда такие системы используются для решения задачи навигации по наблюдаемым навигационным ориентирам, то имеются в виду корреляционно-экстремальные системы навигации. Если они служат для автоматического наведения управляемого средства поражения на атакуемый объект, то в этом случае решается задача самонаведения.

Использовать алгоритм корреляционно-экстремальной навигации необходимо на авиационном комплексе радиообнаружения и наведения — в электронной системе разведки и управления, устанавливаемой на ЛА, которая предназначена для дальнего обнаружения объектов противника, наведения на них средств поражения или перехвата, а также для координации действий сил союзников и решения смежных задач. В целях выполнения указанных задач на авиационном

комплексе необходимо использовать алгоритм корреляционно-экстремальной навигации, устойчивый к различным искажениям фрагмента изображения.

Цель данной работы — рассмотрение характеристик алгоритма корреляционно-экстремальной навигации для ЛА на основе исследования характеристик алгоритмов фазовой и градиентной корреляции.

Алгоритм работы КЭСН. Принцип действия КЭСН [2] основан на сравнении текущего изображения с эталонным. Текущее изображение формируется в процессе движения управляемого объекта, эталонное составляется заранее и вводится в систему управления в виде совокупности признаков цели.

Текущее изображение сравнивается с эталонным с помощью пространственной взаимокорреляционной функции [3] (достигающей своего максимального значения при совмещении текущего и эталонного изображений) или ее производной (принимаяющей свое минимальное значение при совмещении текущего и эталонного изображений).

Методы корреляционно-экстремальной навигации. В качестве таких методов рассматривают следующие корреляции [4–7]: нормированную, фазовую, градиентную.

Под *нормированной корреляцией* понимается классический корреляционный алгоритм, представляющий собой вычисление функции взаимной корреляции (или интеграла типа свертки) с последующим поиском ее максимума. Вычисление функции взаимной корреляции было первым методом, использовавшимся для корреляционной обработки изображений. Причиной широкого применения этого алгоритма стала относительная наглядность его технической реализации.

К недостаткам классического алгоритма следует отнести большие вычислительные затраты, так как вычисление функции взаимной корреляции проводится при всех возможных относительных сдвигах обрабатываемых изображений. Например, при обработке изображений размерами $M \times M$ и $N \times N$ общее число операций умножения определяются по формуле

$$A = [N(N + 1)][M(M + 1)]. \quad (1)$$

При реализации в цифровой форме этот метод не имел определенных преимуществ. Практический интерес к нему появился после разработки алгоритмов быстрого преобразования Фурье (БПФ) [8]. При использовании алгоритмов БПФ число операций умножения рассчитывается как

$$A = 12MN \log_2 N + 4M, \quad (2)$$

где $M \geq N$.

При использовании *обобщенного фазового метода* [9] корреляционная функция вычисляется следующим образом:

$$R(k) = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} \left\{ |g_T(m)| |g_S(m)|^{1-L} \exp \left[j \left(\frac{2\pi mk}{N} + \varphi_T(m) - \varphi_S(m) \right) \right] \right\}. \quad (3)$$

Здесь

$$\begin{aligned} & \sqrt{\operatorname{Re}\{g(m)\}^2 + \operatorname{Im}\{g(m)\}^2}, \\ & \varphi(m) = \arctan \frac{\operatorname{Im}\{g(m)\}}{\operatorname{Re}\{g(m)\}}, \\ & \operatorname{Re}\{g(m)\} = \sum_{l=0}^{N-1} s(l) \cos\left(\frac{2\pi lm}{N}\right), \\ & \operatorname{Im}\{g(m)\} = -\sum_{l=0}^{N-1} s(l) \sin\left(\frac{2\pi lm}{N}\right), \end{aligned}$$

где g — спектр изображения; φ — фазовый спектр изображения; ε и t — индексы, обозначающие эталонное и текущее изображение соответственно; L — интервал корреляции данных, $0 \leq L < 1$; m — число элементов разложения изображений; $k = 0, 1, 2, \dots, N$ — элементы разрешения; l — показатель степени; s — функция сигнала.

Для фазовых алгоритмов характерны полное использование информации, заключенной в фазовой составляющей комплексного спектра сигнала, и частичное использование либо видоизменение информации амплитудной составляющей. Значение фазовой составляющей обусловлено, в частности, тем, что именно в ней сосредоточена вся информация об относительном сдвиге изображений.

Максимум фазовой корреляционной функции рассчитывается следующим образом:

$$R = F^{-1} \left[\frac{F(A)}{|F(A)|} \cdot \frac{F^*(B)}{|F(B)|} \right], \quad (4)$$

где A — кадр; B — фрагмент; F — быстрое преобразование Фурье; F^{-1} — обратное преобразование Фурье; F^* — символ, обозначающий комплексное сопряжение при операциях со спектрами; $(A \cdot B)$ — поэлементное умножение матриц; $|F|$ — модуль числа.

Фазовые алгоритмы разрабатываются для корреляционной обработки изображений, имеющих плоскопараллельный сдвиг. Эти алгоритмы, как правило, весьма чувствительны к вращательному сдвигу изображений, причем с увеличением угла относительно сдвига качество работы алгоритмов резко ухудшается. Однако для ряда применений необходимы алгоритмы, инвариантные к вращательному сдвигу в значительном диапазоне углов. Один из таких алгоритмов — *градиентная корреляция*.

На первом этапе градиентной корреляции [10] вычисляются градиенты серого уровня изображения и фрагмента изображения. На втором этапе из градиентных векторов, попадающих в дискретные интервалы углов, для каждого изображения формулируется гистограмма сумм градиентных векторов как функция угла. Затем эти функции обрабатываются с помощью либо классического корреляционного алгоритма, либо фазовой корреляции.

Алгоритм основан на том, что если одно из изображений повернуто на определенный угол, то градиентный вектор, вычисленный для соответствующих точек обоих изображений, будет повернут на тот же угол.

Максимум градиентной корреляционной функции

$$R = F^{-1} \left[F(|G_A|) \cdot F^*(|G_B|) \right], \quad (5)$$

где G — энергетический спектр изображения.

Максимум покомпонентной градиентной корреляционной функции рассчитывается согласно соотношению

$$R = F^{-1} \left[F \left(\frac{dA}{dx} \right) \cdot F^* \left(\frac{dB}{dx} \right) + F \left(\frac{dA}{dy} \right) \cdot F^* \left(\frac{dB}{dy} \right) \right], \quad (6)$$

где x и y — координаты, по которым выполняется градиентная корреляция.

Исследование характеристик алгоритма корреляционно-экстремальной навигации. В данной работе с воздуха было найдено изображение военного аэродрома «Подужемье». В настоящее время аэродром не эксплуатируется, но до сих пор принадлежит Минобороны России и охраняется комендатурой аэродромного обеспечения. Изображение аэродрома представлено на рис. 1, его фрагмент — на рис. 2.

В качестве алгоритмов корреляционно-экстремальной навигации были выбраны методы фазовой и покомпонентной градиентной корреляции, поскольку в них используется БПФ, сокращающее вычислительные затраты.



Рис. 1. Аэродром «Подужемье»



Рис. 2. Фрагмент изображения аэродрома «Подужемье»

Для исследования характеристик алгоритма были определены ошибки для фазовой и градиентной корреляции в зависимости от изменения яркости, уровня шума и угла поворота фрагмента изображения.

В данном случае ошибка вычисляется согласно соотношению

$$E = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}, \quad (7)$$

где x_1 и y_1 — координаты точки фактического центра фрагмента на изображении в системе координат пикселей исходного изображения (рис. 3); x_2 и y_2 — координаты (в той же системе координат) точки центра фрагмента на изображении, который определяет алгоритм корреляции.



Рис. 3. Система координат пикселей исходного изображения

Графики зависимости ошибки от изменения яркости, угла поворота и уровня шума фрагмента изображения приведены на рис. 4 (а–в). Анализ данных графиков позволяет сделать вывод, что метод фазовой корреляции более устойчив к изменениям яркости и уровню шумов изображения, а к изменению угла поворота более устойчив метод градиентной корреляции.

Критическое изменение угла поворота для градиентной корреляции составляет 5° , что является достаточно малым значением, ведь метод градиентной корреляции инвариантен к вращательному сдвигу в *значительном* диапазоне углов. Это связано с тем, что изображение, выбранное в данной работе, содержит области с сильным градиентом, которые перетягивают отклик на себя. Такие области представлены на рис. 5.

Наряду со зданием на изображении присутствуют дорога и леса, поэтому в работе также была исследована зависимость ошибки от выбранного элемента навигации для фазовой и градиентной корреляции. В качестве элементов навигации рассматривались город, дорога

и лес. На рис. 6 (а–в) изображены графики зависимости ошибки от выбранного элемента для фазовой корреляции, на рис. 7 (а–в) — для градиентной.

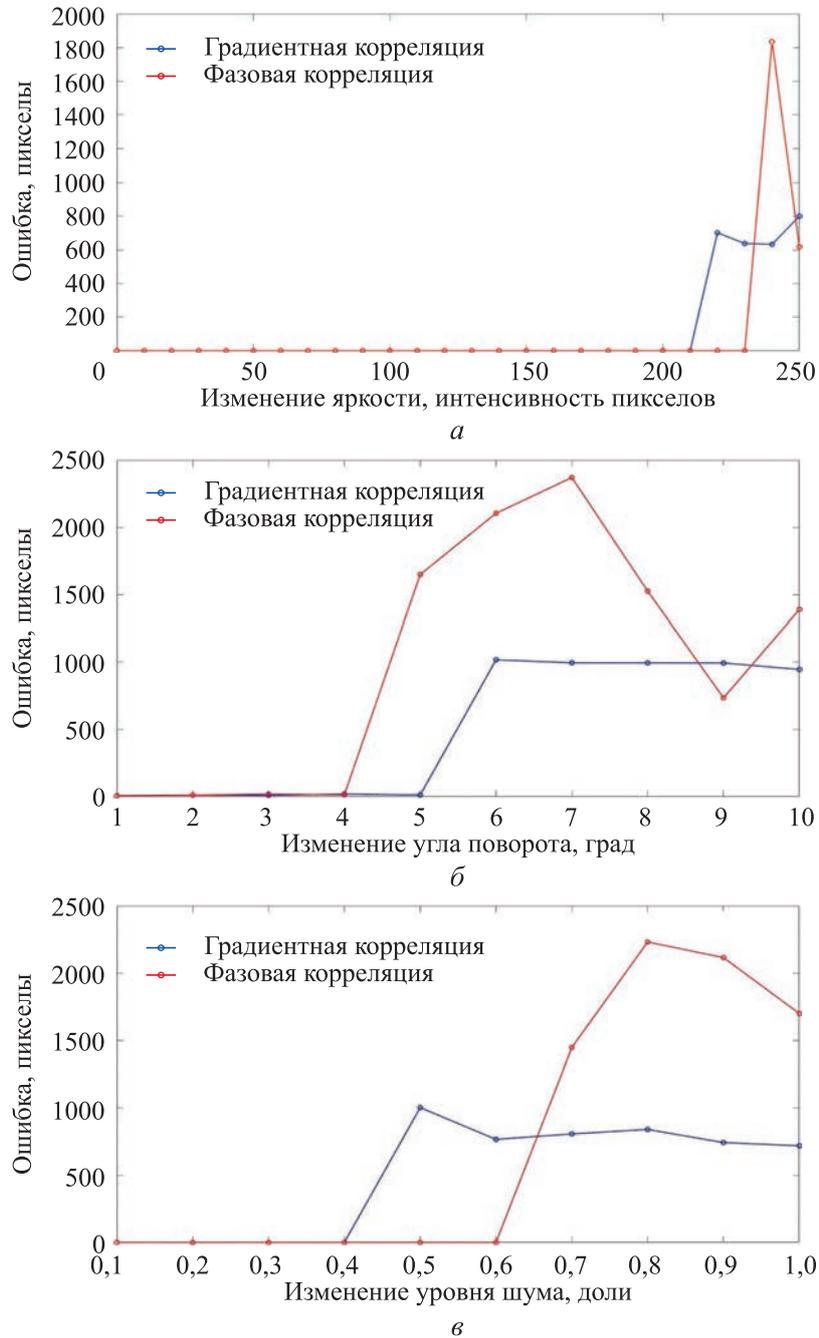


Рис. 4. Зависимость ошибки от изменения яркости (а), угла поворота (б) изображения, а также уровня шума (в) на нем

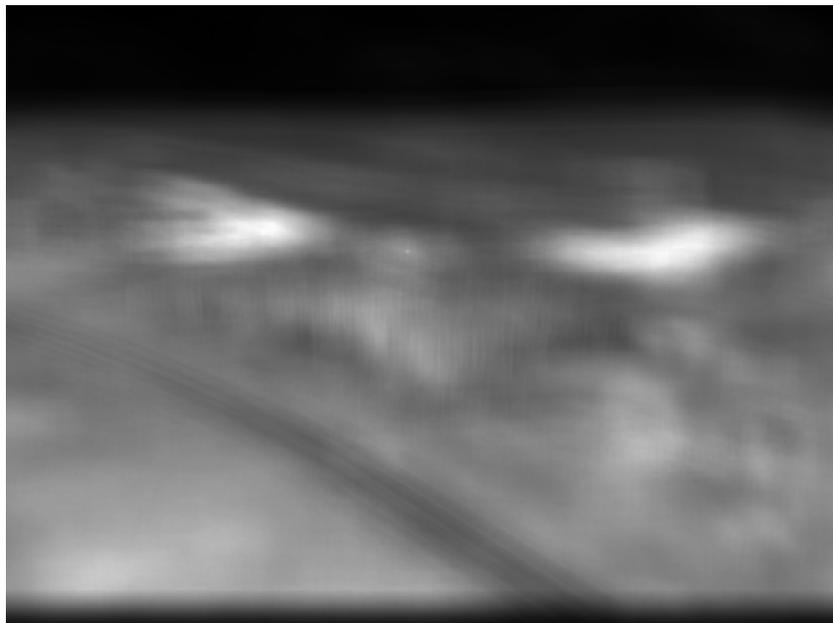


Рис. 5. Градиентные области на выбранном изображении

Если изменяется яркость изображения (рис. 6, *а*), навигация дороги происходит хуже, чем навигация города и леса. При этом критическое изменение яркости изображения для навигации города и леса одинаковое.

При изменении угла поворота изображения (рис. 6, *б*) навигация города происходит лучше навигации дороги и леса. Критическое изменение угла поворота при навигации города составляет 5° , навигации дороги — 2° , навигации леса — 1° .

В случае изменения уровня шума изображения (рис. 6, *в*) критическое изменение уровня шума одинаково для города, дороги и леса и составляет 0,7. Таким образом, навигация всех трех элементов одинаково чувствительна к изменению данного параметра.

Обобщая результаты, полученные при анализе графиков, которые показаны на рис. 6, можно сделать вывод, что при фазовой корреляции навигация города происходит лучше, чем навигация дороги и леса.

В случае изменения яркости изображения (рис. 7, *а*) навигация дороги происходит хуже навигации города и леса, для которых критическое изменение яркости одинаково. Такой же вывод был сделан при анализе аналогичного графика для фазовой корреляции (см. рис. 6, *а*).

При изменении угла поворота изображения (рис. 7, *б*) навигация дороги происходит хуже, чем навигация города и леса. Критическое изменение угла поворота при навигации города и леса составляет 4° , при навигации дороги — 2° .

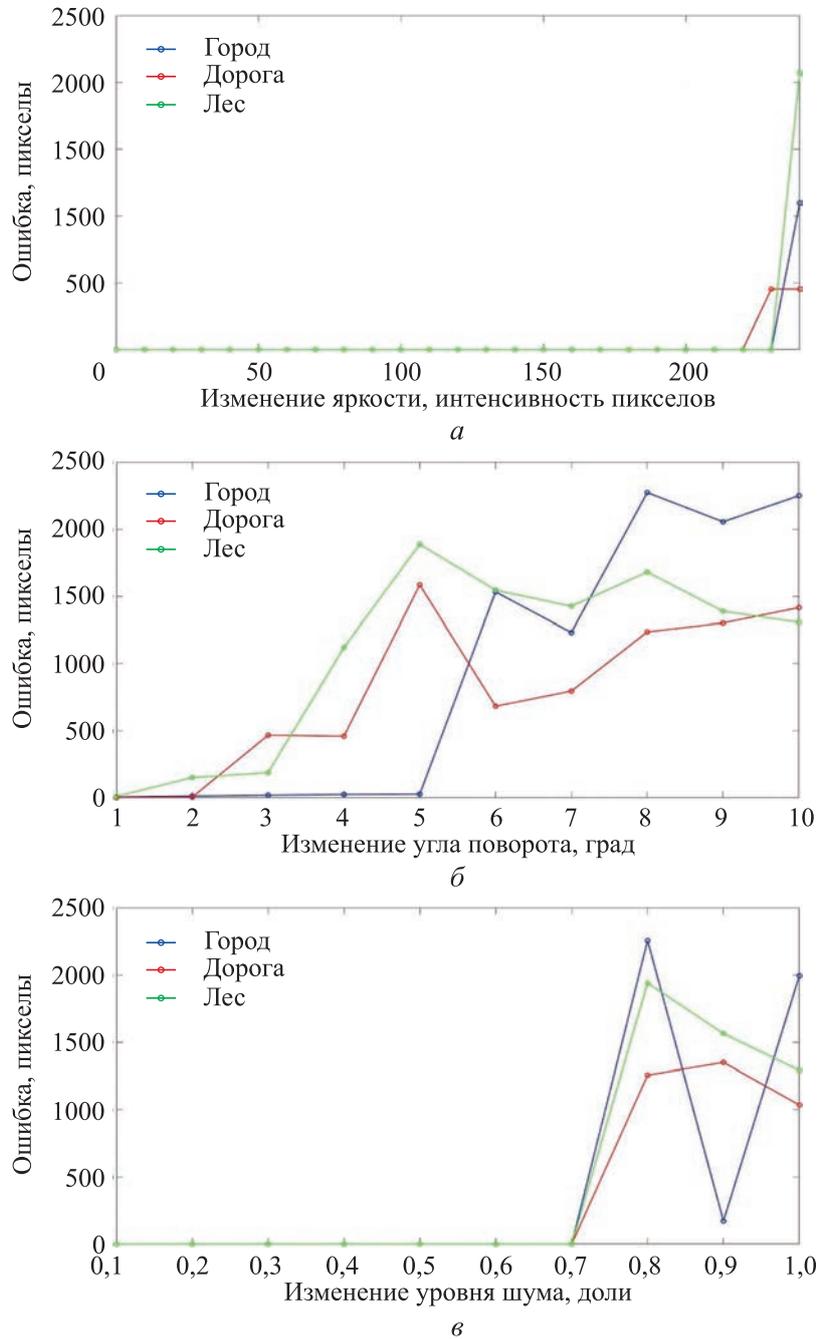


Рис. 6. Зависимость ошибки элемента навигации от изменения яркости (а), угла поворота (б) изображения, а также уровня шума (в) на нем для фазовой корреляции

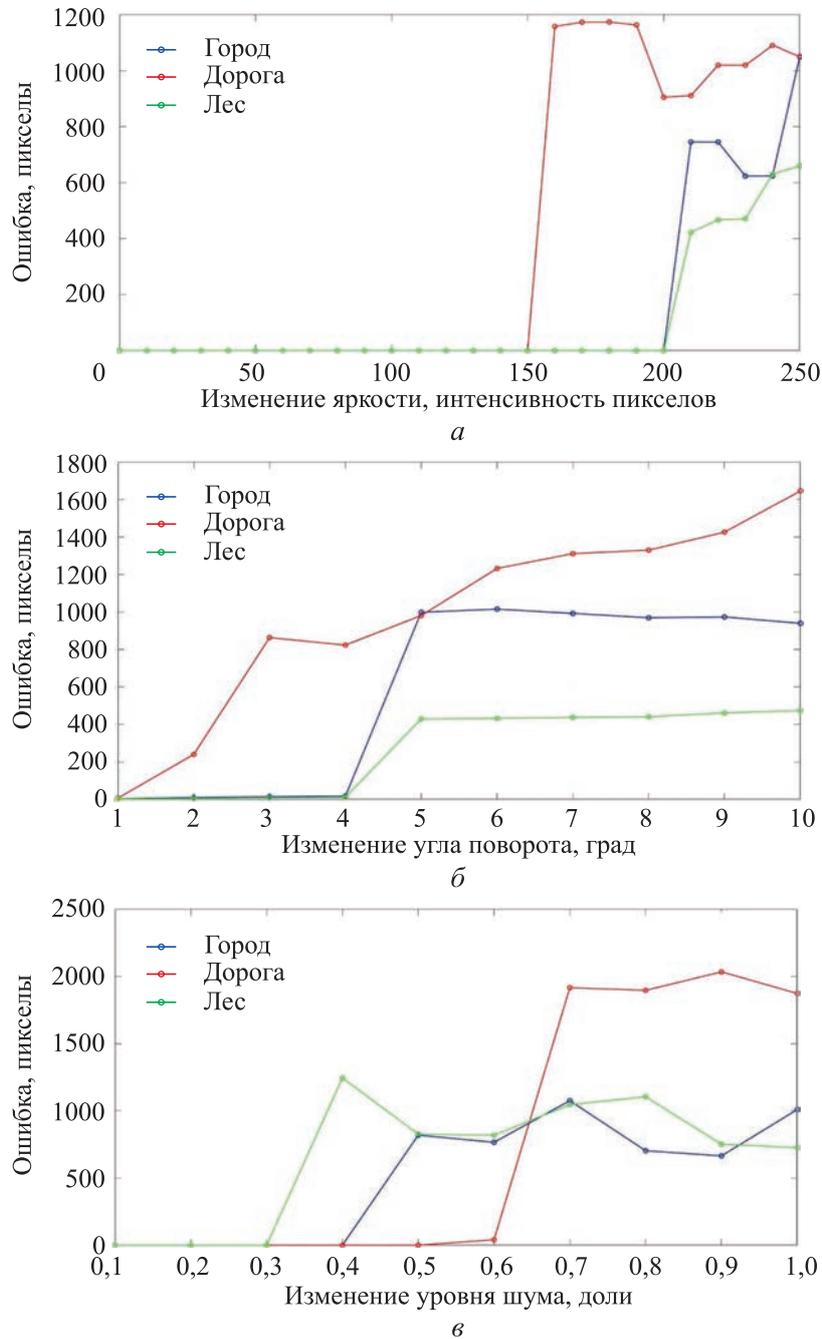


Рис. 7. Зависимость ошибки элемента навигации при изменении яркости (а), угла поворота (б) изображения, а также его уровня шума (в) для градиентной корреляции

Если изменяется уровень шума изображения (рис. 7, в), критическое изменение уровня шума при навигации дороги составляет 0,6, при навигации города — 0,4, при навигации леса — 0,3. Следовательно,

навигация города происходит лучше навигации леса, но хуже навигации дороги.

Обобщая результаты, полученные при анализе графиков, которые приведены на рис. 7, можно сделать вывод, что при покомпонентной градиентной корреляции навигация города происходит лучше, чем навигация дороги и леса.

Таким образом, для фазовой и градиентной корреляции были получены одинаковые результаты — определение фрагмента города на изображении происходит лучше, чем фрагментов дороги и леса. И такой результат неудивителен, ведь город достаточно разнообразен, а дорога и леса — однообразны.

Заключение. В данной работе был рассмотрен алгоритм корреляционно-экстремальной навигации для летательного аппарата. В качестве методов навигации использовались фазовая и покомпонентная градиентная корреляции. С помощью вычисления ошибок были исследованы характеристики алгоритма визуальной навигации. Было получено, что метод фазовой корреляции более устойчив к изменениям яркости и уровню шума изображения, а к изменению угла поворота более устойчивым оказался метод градиентной корреляции. Определение фрагмента города на изображении происходит лучше, чем фрагментов дороги и леса.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Наумов А.И., Кичигин Е.К., Сафонов И.А., Мох Ахмед Медани Ахмед Эламин. Бортовой комплекс высокоточной навигации с корреляционно-экстремальной системой и цифровой картой рельефа местности. *Вестник Воронежского государственного технического университета*, 2013, т. 5, № 6-1, с. 51–55.
- [2] Баклицкий В.К. *Корреляционно-экстремальные методы навигации и наведения*. Тверь, ТО «Книжный клуб», 2009, 360 с.
- [3] Плужников А.Н., Потапов Н.Н. Корреляционно-экстремальная обработка навигационной информации: цифровые алгоритмы и аппаратная реализация. *Датчики и системы*, 2013, № 11 (174), с. 22–27.
- [4] Евтушенко Е.В., Володин А.Н. Корреляционно-экстремальные системы навигации беспилотных летательных аппаратов. *Сборник научных трудов Севастопольского государственного университета по итогам конференции ИСУМ-2018*. Севастополь, 2018, с. 62–65.
- [5] Странгуль О.Н., Тарасенко В.П. Корреляционно-экстремальные системы навигации и локации подвижных объектов. *Автоматика и телемеханика*, 2001, № 7, с. 201–210.
- [6] Сырякин В.И., Шидловский В.С. *Корреляционно-экстремальные радионавигационные системы*. Томск, Изд-во ТГУ, 2010, 316 с.
- [7] Баклицкий В.К., Юрьев А.Н. *Корреляционно-экстремальные методы навигации*. Москва, Радио и связь, 1982, 255 с.
- [8] Нуссбаумер Г. *Быстрое преобразование Фурье и алгоритмы вычисления сверток*. Москва, Радио и связь, 1985, 248 с.

- [9] Чжао М.Н. О применении метода фазовой корреляции для поиска фрагмента изображения. *Инновации. Наука. Образование*, 2022, № 51, с. 1097–1103.
- [10] Brown L.G. *A Survey of Image Registration Techniques*. *ACM Computing Surveys*, 1992, vol. 24, no. 4, pp. 325–376. DOI:10.1145/146370.146374

Статья поступила в редакцию 12.01.2023

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Белозёрова Е.Д. Исследование характеристик алгоритма корреляционно-экстремальной навигации для летательного аппарата. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2023, вып. 4. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2023-4-2269>

Белозёрова Екатерина Дмитриевна — студент МГТУ им. Н.Э. Баумана, кафедра «Системы автоматического управления». e-mail: belozeroваekaterina@icloud.com

Investigating characteristics of the aircraft correlation-extremal navigation algorithm

© E.D. Belozerova

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

Correlation-extremal navigation and guidance systems are widely used in controlling the moving objects. The paper considers the aircraft correlation-extreme navigation algorithm designed for the aviation complexes. This algorithm provides radio identification and guidance for long-range detection of the enemy objects, as well as guidance of the destruction and interception weaponry against it. Classification of methods of the correlation-extreme navigation is presented, and each of the methods is being considered separately. Using the example of an airfield identified from the air, the error between the current and the reference images is determined as the distance between two points in the original image pixel coordinate system. When moving, the object image could be distorted by geometric, luminance and noise transformations. Using the found image, error dependencies on alterations in brightness, rotation angle and noise level of the image fragment, as well as the error dependencies on the selected navigation element, are investigated. Results are presented in the form of graphs. It is shown that the phase correlation method is more resistant to brightness and noise distortions of the image fragment, and the gradient correlation method is more resistant to the geometric transformations. It was found that navigation of heterogeneous and diverse navigation elements (cities) is better than the monotonous and homogeneous ones (roads and forests).

Keywords: *correlation-extremal navigation and guidance systems, phase correlation, gradient correlation, classical correlation algorithm*

REFERENCES

- [1] Naumov A.I., Kichigin E.K., Safonov I.A., Moh Ahmed Medani Ahmed Elamin. Bortovoy kompleks vysokotochnoy navigatsii s korrelyatsionno-ekstremalnoy sistemoy i tsifrovoy kartoy relyefa [The aircraft onboard complex of accurate navigation with terrain reference navigation system and digital map terrain elevation data]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta — Bulletin of Voronezh State Technical University*, 2013, vol. 5, no. 6–1, pp. 51–55.
- [2] Baklitsky V.K. *Korrelyatsionno-ekstremalnye metody navigatsii i navedeniya* [Correlation-extremal methods of navigation and guidance]. Tver, TO Knizhnyi Klub Publ., 2009, 360 p.
- [3] Pluzhnikov A.N., Potapov N.N. Korrelyatsionno-ekstremalnaya obrabotka navigatsionnoy informatsii: tsifrovye algoritmy i apparatnaya realizatsiya [Digital algorithms and hardware implementation of correlational-extremal processing of navigation information]. *Datchiki i sistemi (Sensors and Systems)*, 2013, no. 11 (174), pp. 22–27.
- [4] Evtushenko E.V., Volodin A.N. Korrelyatsionno-ekstremalnye sistemy navigatsii bespilotnykh letatelnykh apparatov [Correlation-extremal navigation systems for unmanned aerial vehicles]. In: *Sbornik nauchnykh trudov Sevastopolskogo gosudarstvennogo universiteta po itogam konferentsii ISUM-2018* [Collection of scientific papers of the Sevastopol State University following results of the ISUM-2018 conference]. Sevastopol, 2018, pp. 62–65.
- [5] Strangul O.N., Tarasenko V.P. Korrelyatsionno-ekstremalnye sistemy navigatsii i lokatsii podvizhnykh obyektov [Correlation-extremal systems for navigation

- and location of moving objects]. *Avtomatika i telemekhanika — Automation and Remote Control*, 2001, no. 7, pp. 201–210.
- [6] Syryamkin V.I., Shidlovsky V.S. *Korrelyatsionno-ekstremalnye radionavigatsionnye sistemy* [Correlation-extreme radio navigation systems]. Tomsk, Tomsk University Publ., 2010, 316 p.
- [7] Baklitsky V.K., Yuriev A.N. *Korrelyatsionno-ekstremalnye metody navigatsii* [Correlation-extreme methods of navigation]. Moscow, Radio i Svyaz Publ., 1982, 255 p.
- [8] Nussbaumer H. *Fast Fourier Transform and Convolution Algorithms*. Springer Berlin, Heidelberg, 1982 [In Russ.: Nussbaumer G. Bystroe preobrazovanie Furie i algoritmy vychisleniya svertok. Moscow, Radio i Svyaz Publ., 1985, 248 p.].
- [9] Zhao M.N. O primenenii metoda fazovoy korrelyatsii dlya poiska fragmenta izobrazheniya [On application of the phase correlation method to search for an image fragment]. *Innovatsii. Nauka. Obrazovanie — Innovation. Science. Education*, 2022, no. 51, pp. 1097–1103.
- [10] Brown L.G. *A Survey of Image Registration Techniques*. *ACM Computing Surveys*, 1992, vol. 24, no. 4, pp. 325–376. <https://doi.org/10.1145/146370.146374>

Belozeroва E.D., Student, Department of Automatic Control Systems, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: belozeroваekaterina@icloud.com