

С.В. Кулешов, А.В. Кваснов, А.А. Зайцева, А.Л. Ронжин

**КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К ВИЗУАЛЬНОЙ НАВИГАЦИИ
ПО ЕСТЕСТВЕННЫМ ОРИЕНТИРАМ ДЛЯ БПЛА, РАБОТАЮЩИХ
В УСЛОВИЯХ НЕДОСТУПНОСТИ ГНСС**

Целью исследования является обеспечение возможности навигации БПЛА при невозможности применения спутниковых средств глобального позиционирования с использованием ГНСС в условиях РЭБ. Для достижения поставленной цели предлагается комплексный подход к обеспечению навигации БПЛА по визуальным ориентирам с использованием систем технического зрения. Предлагается синтез изображений подстилающей поверхности за счет комплексирования данных сенсоров, повышающий качество позиционирования БПЛА при условии отсутствия спутниковых навигационных систем. Показано, что при совмещении изображений дистанционного зондирования, имеющих различную природу происхождения и изменяющиеся внешние условия эксплуатации (день-ночь, зима-лето и т.д.), важно наиболее полно локализовать объекты подстилающей поверхности. В системе технического зрения для визуальной навигации БПЛА по естественным ориентирам предложен метод электромеханической развертки изображения, позволяющий увеличить поле зрения камеры произвольного диапазона. Проведено моделирование характеристик системы технического зрения с электромеханической разверткой для определения границ применимости к задаче визуальной навигации. Показано, что наиболее значимым параметром точности позиционирования является высота съемки подстилающей поверхности, которая квазилинейна при условии фиксированного угла наклона камеры, а для качественного позиционирования наилучшим вариантом является фронтальное положение камеры в точке надира. Предложенный подход позволяет создавать виртуальные 3D-модели подстилающей поверхности, тем самым увеличивая возможности по более точному распознаванию объектов на основе масштаба и размеров сегментируемых областей. Измерение угла места камеры может быть использовано для обнаружения и распознавания естественных ориентиров, которые могут быть заранее определены (точки пересечения дорог, здания или сооружения, объекты коммуникаций и т.д.). С другой стороны, фронтальное положение камеры с нулевым углом места выгодно для сверки маршрута полета, позиционируя положение БПЛА относительно опорного ориентира. Это обусловлено тем, что с широким использованием программного обеспечения, основанного на математических моделях, технологию фотограмметрической линейки стало целесообразно применять для количественного измерения планов местности и карт.

БПЛА; визуальная навигация; комплексирование данных; техническое зрение.

S.V. Kuleshov, A.V. Kvasnov, A.A. Zaytseva, A.L. Ronzhin

**MULTIPURPOSE APPROACH TO VISUAL NAVIGATION BASED ON
LANDSCAPES FOR UAVS OPERATING IN GNSS-UNAVAILABLE CONDITIONS**

The aim of the study is to provide the possibility of UAV navigation when it is impossible to use satellite global positioning systems using GNSS in electronic warfare conditions. To achieve this goal, a comprehensive approach to ensuring UAV navigation by visual landmarks using machine vision systems is proposed. It is proposed to synthesize images of the underlying surface by combining sensor data, which improves the quality of UAV positioning in the absence of satellite navigation systems. It is shown that when combining remote sensing images of different origin and changing external operating conditions (day-night, winter-summer, etc.), it is important to most fully localize the objects of the underlying surface. In the machine vision system for visual navigation of UAVs by natural landmarks, a method of electromechanical image scanning is proposed, which allows increasing the field of view of a camera of an arbitrary range. Modeling of the characteristics of the machine vision system with electromechanical scanning is carried out to determine the limits of applicability to the problem of visual navigation. It is shown that the most significant parameter of positioning accuracy is the shooting height of the underlying surface, which is quasi-linear under the condition of a fixed camera tilt angle, and for high-quality positioning, the best option is the frontal position of the camera at the nadir point. The proposed approach allows creating virtual 3D models of the underlying surface, thereby increasing the capabilities for more accurate recognition of objects based on the scale and size of the segmented areas. Measuring the camera elevation angle can be used to detect and recognize natural landmarks that can be predetermined (road intersections,

buildings or structures, utility facilities, etc.). On the other hand, the frontal position of the camera with a zero elevation angle is advantageous for verifying the flight route, positioning the UAV relative to the reference landmark. This is due to the fact that with the widespread use of software based on mathematical models, the photogrammetric ruler technology has become appropriate for quantitative measurement of terrain plans and maps.

UAV; visual navigation; data complexing; computer vision.

Введение. Характерной тенденцией современных беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и беспилотных авиационных комплексов (БАК) становится повышение автономности их функционирования. Это, в свою очередь, требует использования навигационных средств, позволяющих принимать решения об управлении полетом и выполнения целевых задач только бортовыми средствами без организации канала передачи данных с наземной станцией управления. Отдельным вариантом применения навигационных средств является режим «радиомолчания», когда используются только пассивные средства определения пространственного местоположения БПЛА без излучения физических полей.

Последние годы показали, что широко используемые спутниковые средства глобального позиционирования с использованием ГНСС в условиях применения РЭБ становятся неэффективными и бесполезными. Эффекты применения РЭБ могут проявляться как снижение точности позиционирования, невозможность позиционирования, искажение позиционирования (ложное позиционирование) [1–5]. В частности, в работе [6] проводится моделирование, при котором позиция объекта начинает двигаться по круговой траектории вокруг некоторого центра (рис. 1). Даже в случае успешного обнаружения факта атаки далеко не всегда удастся корректно определить реальные координаты объекта на основе сигнала, принимаемого ГНСС приемником.

Таким образом, в настоящее время особую актуальность приобретают исследования, направленные на решение задачи определения пространственного положения БПЛА без использования ГНСС, определение их возможностей, теоретических и эксплуатационных ограничений.

В авиационных навигационных системах известны подходы комплексирования данных от различных источников для повышения точности определения местоположения, в том числе с использованием данных визуальной навигации [7–9]

Существуют подходы к повышению точности инерциальной навигационной системы летательного аппарата в условиях отсутствия высокоточных дополнительных датчиков информации, например GPS за счет комплексирования [10].

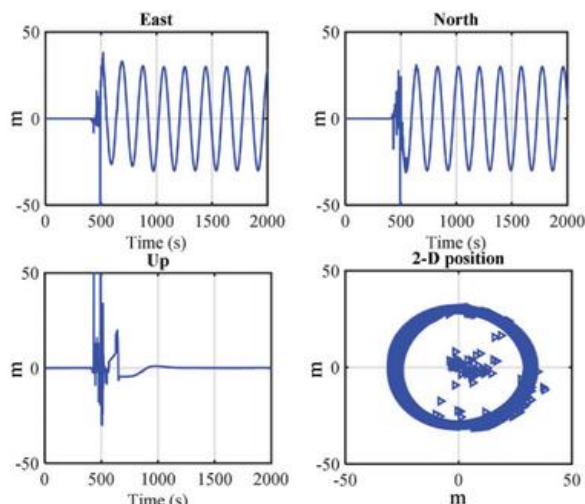


Рис. 1. Результат моделирования спуфинговой атаки на сигнал ГНСС из работы [6]

Принимая во внимание технические ограничения существующих датчиков, для успешной навигации БПЛА актуальны процедуры по совмещению разнородной информации, получаемой от аппаратных сенсоров. Эти процедуры могут включать:

- ♦ выделение, распознавание и отождествление точек привязки – объектов местности и инфраструктуры на изображениях различного спектрального диапазона (видимый, инфракрасный, режим синтезированной апертуры (РСА));
- ♦ обнаружение неподвижных радиоконтрастных объектов радарными непрерывного действия или лидарами, работающими на заданных объектных ориентирах.

Варианты комплексирования данных для навигации в условиях отсутствия ГНСС. Стратегия определения положения БПЛА на местности может быть 2 типов в зависимости от априорных знаний:

- 1) локализация в условиях априорной неопределенности (положение БПЛА известно с точностью до района полетов) – в этом случае производится поиск фрагмента изображения с датчиков БПЛА с картой местности всего района;
- 2) локализация в условиях априорного знания о местоположении, когда в процессе выполнения полета производится сличение изображений с датчиков БПЛА с фрагментами карты, где БПЛА находился в предыдущий момент времени с целью уточнения текущего местоположения.

В первом случае, система навигации БПЛА опирается на визуальные датчики (камеры видимого и инфракрасного диапазонов, режим РСА), с помощью которых навигационная система фиксирует подстилающую поверхность с заданной периодичностью. Далее с помощью системы технического зрения обнаруживаются характерные объекты местности, используемые для совмещения снимка с картой местности. Совмещенные данные позволяют корректировать данные о месте (пространственном положении), а также траекторию полета БПЛА (рис. 2).

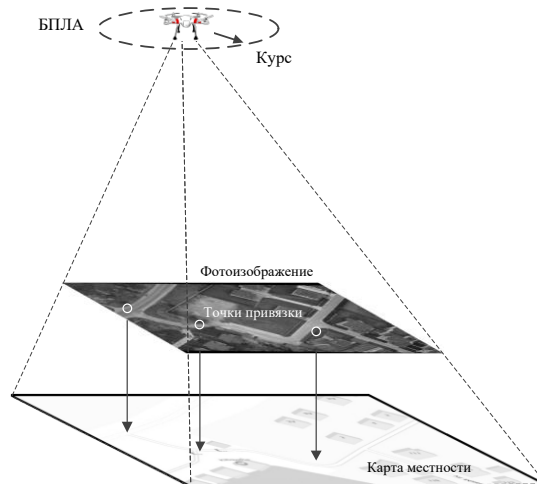


Рис. 2. Иллюстрация технологии синтеза изображений и карты местности с целью определения пространственного положения БПЛА

При совмещении изображений дистанционного зондирования, имеющих различную природу происхождения (оптический диапазон + РСА, ИК диапазон + оптический диапазон, данные дистанционного зондирования земли – аэрофотоснимки, картографическое изображение) и условия эксплуатации (день-ночь, зима-лето и т.д.), важно наиболее полно отразить все возможные объекты подстилающей поверхности. В литературе достаточно широко рассмотрены технологии и методы совмещения/комплексирования изображений:

- ♦ метод взаимной корреляции [11];

- ♦ согласование спектральных точек (Spectral point matching - SPM) (в то числе на основе диаграммы Вороного) [12, 13];
- ♦ масштабно-инвариантное преобразование объектов (scale-invariant feature transform – SIFT) [13, 14];
- ♦ использование структурных дескрипторов [14, 15];
- ♦ на основе адаптация к предметной области – (Domain adaptation), в том числе использование различных метрики – Евклида, Хаусдорфа и т.д. [16, 17].

Модель расширения поля зрения камеры произвольного диапазона. Прямое повышение характеристик бортовых систем технического зрения ограничивается массогабаритными факторами аппаратуры и ее энергоэффективностью. Для оптических средств, помимо обозначенных факторов, существенно важно наличие высокого разрешения видеокамеры и широкое поле зрения.

К сожалению, применение широкоугольных камер (так называемый «рыбий глаз») приводит к естественным эффектам оптической аберрации, когда возникают нелинейные искажения относительно фокусной оси этой камеры. В области инфракрасного диапазона к этому явлению также добавляются технологические трудности производства подобных устройств, из-за чего стоимость и масса аппаратуры существенно возрастает.

В качестве варианта решения подобной проблемы при проектировании бортовых камер для решения навигационных задач можно предложить, электромеханическое сканирование подстилающей поверхности (рис. 3).

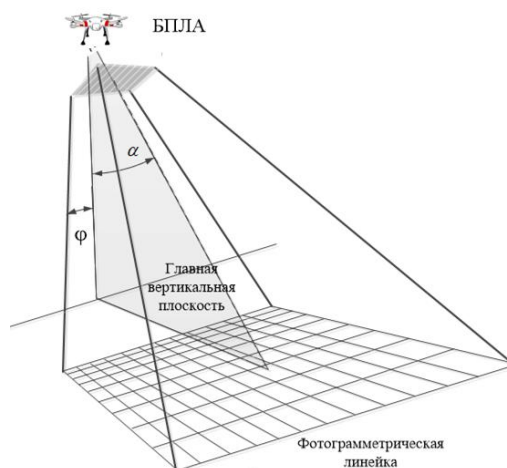


Рис. 3. Оценка изображения подстилающей поверхности с помощью фотограмметрической линейки

Цель электромеханического сканирования – преодоление трудностей, возникающих в ситуации, когда БПЛА преодолевает участки «однородной» местности, не имеющей естественных ориентиров (например, густой лес, или широкая водная поверхность). В этом случае возможно применение технологий так называемой фотограмметрической линейки, то есть оценка координат подстилающей поверхности на основе теории геометрической оптики [18, 19].

В общем случае, решение задачи об определении координаты точки местности основано на системе уравнений [20, 21]:

$$\begin{cases} X - X_s = (Z - Z_s) \frac{a_1(x - x_0) + a_2(y - y_0) - a_3f}{c_1(x - x_0) + c_2(y - y_0) - c_3f}, \\ Y - Y_s = (Z - Z_s) \frac{b_1(x - x_0) + b_2(y - y_0) - b_3f}{c_1(x - x_0) + c_2(y - y_0) - c_3f} \end{cases}$$

где x_0 и y_0 – начальное положение систем координат снимка БПЛА относительно некоторой фиксированной точки о пространства; X и Y – координаты точки на снимке относительно начала координат $Ox_s Y_s Z_s$; f – фокусное расстояние; $a; b; c_i$ – направляющие косинусы, зависящие от углов внешнего ориентирования.

Для случая, когда камера БПЛА совершает повороты только вокруг поперечной оси БПЛА (угол тангажа – α), тогда представленная система уравнений преобразуются к следующему виду:

$$X = H \frac{x}{f \cos(\alpha) - y \sin(\alpha)}; \quad Y = H \frac{f \sin(\alpha) + y \cos(\alpha)}{f \cos(\alpha) - y \sin(\alpha)}.$$

Начало отсчета в системе координат снимка совпадает с центром фотоизображения, а координаты точек местности X и Y отсчитываются относительно точки надир, полученного в результате опущенного перпендикуляра из точки БПЛА на поверхность Земли. При значениях угла $\alpha = 0 \dots 50$ градусов величина вертикального разрешения естественным образом сокращается (рис. 4)

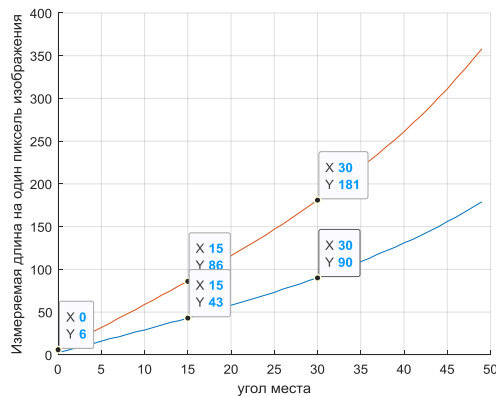


Рис.4. Зависимость потенциальной точности определения места по подстилающей поверхности в зависимости от угла места: красная кривая – высота БПЛА 300 м, синяя кривая – высота БПЛА 150 м

При $\alpha = 0$, т.е. для камеры, выставленной в надир (вертикально вниз), разрешение каждой точки поверхности обратно пропорционально значению фокусного расстояния f согласно системе уравнений $Y = H (y/f)$. Таким образом, точность обнаружения и идентификации естественных ориентиров зависит от разрешения камеры и ее фокусного расстояния (рис. 5).



Рис. 5. Фотограмметрическая линейка для случая съемки в надир в видимом диапазоне с высоты 150 м

В случае вертикального отклонения камеры, точность измерений подстилающей поверхности нелинейно сокращается (рис. 4), что приводит к проективным искажениям, не позволяющим должным образом оценивать естественные ориентиры на местности (рис. 6).

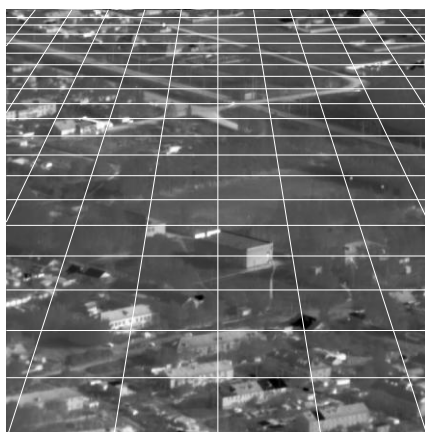


Рис. 6. Фотограмметрическая линейка для случая наклонной съемки ($\alpha = 550$) в инфракрасном диапазоне с высоты 300 м

Можно сделать определённый вывод, что при сравнительно небольших углах отклонения камеры (в интервале $15...20^\circ$) на высоте полета БПЛА 150...300 м возможно применение технологии сегментированного распознавания объектов, используемых как естественные ориентиры для визуальной навигации.

Потеря точности относительно увеличения угла наклона камеры преимущественно происходит вдоль вертикальной оси. Это обусловлено математической формализацией задачи проективной геометрии, описывающей технологию фотограмметрии подстилающей поверхности, а также влиянием крутизны Земли. Для более наглядной интерпретации полученных результатов (рис. 5, 6) оценка погрешностей приведена в сводных таблицах, где учитывается различная высота полета и разное разрешение камеры, осуществляющей мониторинг подстилающей поверхности (табл. 1 и 2).

Таблица 1

Точность определения расстояния на подстилающей поверхности в зависимости от угла места при высоте съемки 150 м и переменных параметрах фокусного расстояния и количества пикселей вдоль вертикальной оси камеры

Угол наклона камеры в вертикальной оси	Фокусное расстояние $\Gamma_{\text{камеры}} = 0.05 \text{ м}$		Фокусное расстояние $\Gamma_{\text{камеры}} = 0.2 \text{ м}$	
	Разрешение изображения вдоль вертикальной оси		Разрешение изображения вдоль вертикальной оси	
	$Q_{\text{пикселей}} = 512$	$Q_{\text{пикселей}} = 1080$	$Q_{\text{пикселей}} = 512$	$Q_{\text{пикселей}} = 1080$
0°	1	<1	<1	<1
10°	27	27	27	27
20°	55	55	55	55
30°	88	87	87	87
40°	127	127	126	126
50°	181	180	179	179

Таблица 2

Таблица точности определения расстояния на подстилающей поверхности в зависимости от угла места при высоте съемки 300м и переменных параметрах фокусного расстояния и количества пикселей вдоль вертикальной оси камеры

Угол наклона камеры в вертикальной оси	Фокусное расстояние $\Gamma_{\text{камеры}} = 0.05$		Фокусное расстояние $\Gamma_{\text{камеры}} = 0.2$	
	Разрешение изображения вдоль вертикальной оси		Разрешение изображения вдоль вертикальной оси	
	$Q_{\text{пикселей}} = 512$	$Q_{\text{пикселей}} = 1080$	$Q_{\text{пикселей}} = 512$	$Q_{\text{пикселей}} = 1080$
0°	2	1	<1	<1
10°	55	54	53	53
20°	111	110	110	109
30°	175	174	174	173
40°	254	253	252	252
50°	361	359	358	358

Сравнительный анализ показывает, что наиболее значимым параметром точности позиционирования является высота съемки подстилающей поверхности, которая квазилинейна при условии фиксированного угла наклона камеры. Влияние разрешения камеры и переменного фокусного расстояния минимально. Рассчитанные величины актуальны в случае применения технологии одометрии, когда необходимо осуществлять навигацию по естественным ориентирам. Очевидно, что для качественного позиционирования наилучшим вариантом является фронтальное положение камеры в точке надира (рис. 7).

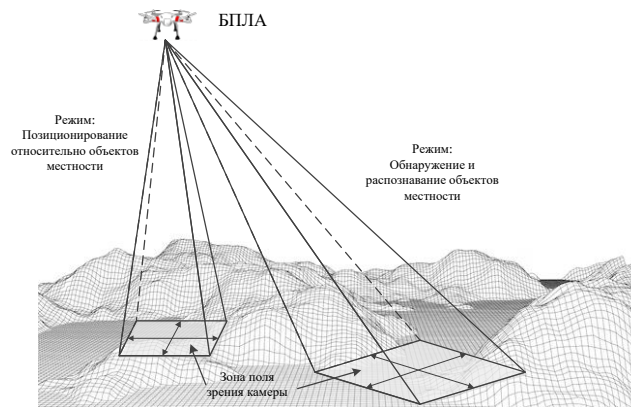


Рис. 7. Положение камеры БПЛА относительно зоны сканирования для основных режимов работы

Учитывая тот факт, что максимальное поле зрения большинства камер как видимого, так и инфракрасного диапазонов вдоль главного вертикала (то есть вдоль угла места) колеблется в пределах $35...45^\circ$, то на высоте 150-300м на краях снимка точность измерений может достигать 150-250 метров/пиксель. Очевидно, что для фронтального положения камеры следует ограничиваться $0...5^\circ$, где погрешность не будет превышать величины 20-25 метров/пиксель.

Заключение. Предложенный подход позволяет создавать виртуальные 3D-модели подстилающей поверхности, тем самым увеличивая возможности по более точному распознаванию объектов на основе масштаба и размеров сегментируемых областей. Измерение угла места камеры может быть использовано для обнаружения и распознавания естественных ориентиров, которые могут быть заранее определены (точки пересечения до-

рог, здания или сооружения, объекты коммуникаций и т.д.). С другой стороны, фронтальное положение камеры с нулевым углом места выгодно для сверки маршрута полета, позиционируя положение БПЛА относительно опорного ориентира. Это обусловлено тем, что с широким использованием программного обеспечения, основанного на математических моделях, технологию фотограмметрической линейки стало целесообразно применять для количественного измерения планов местности и карт.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Jafarnia-Jahromi, Ali & Broumandan, Ali & Nielsen, J. & Lachapelle, Gérard*. GPS Vulnerability to Spoofing Threats and a Review of Antispoofing Techniques // *International Journal of Navigation and Observation*. – 2012. – 10.1155/2012/127072.
2. *Пантенков Д.Г., Литвиненко В.П., Глушков А.Н.* Основные проблемные вопросы и современные подходы к противодействию малоразмерным разведывательно-ударным беспилотным летательным аппаратам // *Вестник Воронежского государственного технического университета*. – 2023. – Т. 19, № 4. – С. 77-88. – DOI: 10.36622/VSTU.2023.19.4.010.
3. *Савин И.В.* GPS-спуфинг как актуальная угроза системе позиционирования GPS // *Наука сегодня: история и современность: Матер. международной научно-практической конференции, Вологда, 25 октября 2017 года*. Т. 1. – Вологда: ООО «Маркер», 2017. – С. 68-70.
4. *Кривенков Д.В.* GPS - спуфинг принцип работы, его воздействие и слабые места // *Технические и математические науки. Студенческий научный форум: Электронный сборник статей по материалам V студенческой международной научно-практической конференции*. Т. 5 (5): Общество с ограниченной ответственностью "Международный центр науки и образования", 2018. – С. 37-43. – EDN LXMAXZ.
5. *Басан Е.С., Абрамов Е.С., Басюк А.Г., Сушкин Н.А.* Метод обнаружения атак на систему навигации БПЛА // *Информатика и автоматизация*. – 2021. – Т. 20, № 6. – С. 1368-1394. – DOI: 10.15622/ia.20.6.7.
6. *Nobody's Fool. Spoofing Detection in a High-Precision Receiver* // *Inside GNSS*. – July/August 2020. – Свободный режим доступа: <https://insidegnss.com/nobodys-fool-spoofing-detection-in-a-high-precision-receiver> (дата обращения: 15.02.2025).
7. *Труфанов М.И., Панищев В.С., Фролов М.М.* Система технического зрения с множественными источниками изображений // *Информационные технологии и математическое моделирование систем 2020: Труды международной научно-технической конференции, Одинцово, Московская область, 16–19 ноября 2020 года*. – Одинцово, Московская область: ЦИТП РАН, 2020. – С. 124-126. – DOI: 10.36581/CITP.2020.11.84.027.
8. *Замыслов М.А., Мальцев А.М., Михайленко С.Б., Штанькова Н.В.* Способ вывода летательного аппарата в точку начала посадки при отказе (отсутствии) бортового или наземного оборудования радиотехнической системы ближней навигации // *Проблемы безопасности полетов*. – 2019. – № 11. – С. 14-21. – DOI: 10.36535/0235-5000-2019-11-2.
9. *Ma X., Liu X., Li C.-L., Che S.* Multi-source information fusion based on factor graph in autonomous underwater vehicles navigation systems // *Assembly Automation*. – 2021. – Vol. 41, No. 5. – P. 536-545. – DOI: 10.1108/AA-10-2020-0155.
10. *Неусытин К.А., Пролетарский А.В., Селезнева М.С.* Алгоритмы комплексирования инерциальной навигационной системы с датчиками угловых ускорений // *Мехатроника, автоматизация, управление*. – 2023. – 24 (2). – P. 107-112. – DOI: 10.17587/mau.24.107-112.
11. *Yingbing Liu, Yingcheng Zhou, Yongsheng Zhou, Lixiang Ma, Bingnan Wang, Fan Zhang*. Accelerating SAR Image Registration Using Swarm-Intelligent GPU Parallelization // *IEEE Journal of selected topics in applied earth observations and remote sensing*. – 2020. – Vol. 13. – P. 5694-5703.
12. *Haigang Sui, Chuan Xu, Junyi Liu, and Feng Hua*. Automatic Optical-to-SAR Image Registration by Iterative Line Extraction and Voronoi Integrated Spectral Point Matching // *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*. – November 2015. – Vol. 53, No. 11. – P. 6058-6072.
13. *Guoping Zhang, Haigang Sui, Zhina Song, Feng Hua, Li Hua*. Automatic Registration Method of SAR and Optical Image Based on Line Features and Spectral Graph Theory // *2nd International Conference on Multimedia and Image Processing*. – 2017. – P. 64-67.
14. *Bin Fan, Chunlei Huo, Chunhong Pan, Qingqun Kong*. Registration of Optical and SAR Satellite Images by Exploring the Spatial Relationship of the Improved SIFT // *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. – July 2013. – Vol. 10, No. 4. – P. 657-661.
15. *Qiuzhe Yu, Dawen Ni, Yuxuan Jiang, Yuxuan Yan, Jiachun An, Tao Sun*. Universal SAR and optical image registration via a novel SIFT framework based on nonlinear diffusion and a polar spatial-frequency descriptor // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. – 2021. – Vol. 171. – P. 1-17.
16. *Sourabh Paul, Umesh C. Pati*. Automatic optical-to-SAR image registration using a structural descriptor // *IET Image Processing*. – November 2019. – Vol. 14, No. 1. – P. 62-73.

17. Zhaoxiang Zhang, Yuelei Xu, Qi Cui, Qing Zhou, Linhua Ma. Unsupervised SAR and Optical Image Matching Using Siamese Domain Adaptation // IEEE Transaction on geoscience and remote sensing. – May 2022. – Vol. 60.
18. Skolnik M. I. Radar handbook. – 3rd ed. – New-York: The McGraw-Hill Companies, 1327 p.
19. El-Darymli K., Gill E.W., Mcguire P., Power D. and Moloney C. Automatic Target Recognition in Synthetic Aperture Radar Imagery: A State-of-the-Art Review // IEEE Access. – 2016. – Vol. 4. – P. 6014-6058.
20. Костров В.В., Толстов Е.Ф. Проблемы дистанционного зондирования Земли с использованием космических РСА высокого разрешения // VII Всероссийские Армандовские чтения: молодая школа. Муром 27–29 июня 2017 года. – С. 76-113.
21. Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction. – 2nd ed. – Springer Series in Statistics, 2009. – 739 p.

REFERENCES

1. Jafarnia-Jahromi, Ali & Broumandan, Ali & Nielsen, J. & Lachapelle, Gérard. GPS Vulnerability to Spoofing Threats and a Review of Antispoofing Techniques, *International Journal of Navigation and Observation*, 2012. 10.1155/2012/127072.
2. Pantenkov D.G., Litvinenko V.P., Glushkov A.N. Osnovnye problemnye voprosy i sovremennye podkhody k protivodeystviyu malorazmernym razvedyvatel'no-udarnym bespilotnym letatel'nym apparatam [Main problematic issues and modern approaches to countering small-sized reconnaissance and strike unmanned aerial vehicles], *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Voronezh State Technical University], 2023, Vol. 19, No. 4, pp. 77-88. DOI: 10.36622/VSTU.2023.19.4.010.
3. Savin I.V. GPS-spufig kak aktual'naya ugroza sisteme pozitsionirovaniya GPS [GPS spoofing as a current threat to the GPS positioning system], *Nauka segodnya: istoriya i sovremennost': Mater. mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Vologda, 25 oktyabrya 2017 goda* [Science today: history and modernity: Proceedings of the international scientific and practical conference, Vologda, October 25, 2017]. Vol. 1. Vologda: ООО «Marker», 2017, pp. 68-70.
4. Krivenkov D.V. GPS - spufig printsip raboty, ego vozdeystvie i slabye mesta [GPS - spoofing principle of operation, its impact and weaknesses], *Tekhnicheskie i matematicheskie nauki. Stencheskiy nauchnyy forum: Elektronnyy sbornik statey po materialam V studencheskoy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. T. 5 (5): Obshchestvo s ogranichennoy otvetstvennost'yu "Mezhdunarodnyy tsentr nauki i obrazovaniya"*, 2018 [Technical and mathematical sciences. Student scientific forum: Electronic collection of articles based on the materials of the V student international scientific and practical conference. Vol. 5 (5): Limited Liability Company "International Center for Science and Education", 2018], pp. 37-43. EDN LXMAXZ.
5. Basan E.S., Abramov E.S., Basyuk A.G., Sushkin N.A. Metod obnaruzheniya atak na sistemu navigatsii BPLA [Method for detecting attacks on the UAV navigation system], *Informatika i avtomatizatsiya* [Computer Science and Automation], 2021, Vol. 20, No. 6, pp. 1368-1394. DOI: 10.15622/ia.20.6.7.
6. Nobody's Fool. Spoofing Detection in a High-Precision Receiver, *Inside GNSS*. July/August 2020. – Available at: <https://insidengss.com/nobodys-fool-spoofing-detection-in-a-high-precision-receiver> (accessed 15 February 2025).
7. Trufanov M.I., Panishchev V.S., Frolov M.M. Sistema tekhnicheskogo zreniya s mnozhestvennymi istochnikami izobrazheniy [Machine vision system with multiple image sources], *Informatsionnye tekhnologii i matematicheskoe modelirovanie sistem 2020: Trudy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, Odintsovo, Moskovskaya oblast', 16–19 noyabrya 2020 goda* [Information technologies and mathematical modeling of systems 2020: Proceedings of the international scientific and technical conference, Odintsovo, Moscow region, November 16-19, 2020]. Odintsovo, Moskovskaya oblast': TSITP RAN, 2020, pp. 124-126. DOI: 10.36581/CITP.2020.11.84.027.
8. Zamylov M.A., Mal'tsev A.M., Mikhaylenko S.B., Shtan'kova N.V. Sposob vyvoda letatel'nogo apparata v točku nachala posadki pri otkaze (otsutstvii) bortovogo ili nazemnogo oborudovaniya radiotekhnicheskoy sistemy blizhney navigatsii [Method for bringing an aircraft to the landing start point in case of failure (absence) of on-board or ground equipment of the short-range radio navigation system], *Problemy bezopasnosti poletov* [Flight safety issues], 2019, No. 11, pp. 14-21. DOI: 10.36535/0235-5000-2019-11-2.
9. Ma X., Liu X., Li C.-L., Che S. Multi-source information fusion based on factor graph in autonomous underwater vehicles navigation systems, *Assembly Automation*, 2021, Vol. 41, No. 5, pp. 536-545. DOI: 10.1108/AA-10-2020-0155.
10. Neusypin K.A., Proletarskiy A.V., Selezneva M.S. Algoritmy kompleksirovaniya inertsiyal'noy navigatsionnoy sistemy s datchikami uglovykh uskoreniy [Algorithms for integrating an inertial navigation system with angular acceleration sensors], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, automation, control], 2023, 24 (2), pp. 107-112. DOI: 10.17587/mau.24.107-112.

11. Yingbing Liu, Yingcheng Zhou, Yongsheng Zhou, Lixiang Ma, Bingnan Wang, Fan Zhang. Accelerating SAR Image Registration Using Swarm-Intelligent GPU Parallelization, *IEEE Journal of selected topics in applied earth observations and remote sensing*, 2020, Vol. 13, pp. 5694-5703.
12. Haigang Sui, Chuan Xu, Junyi Liu, and Feng Hua. Automatic Optical-to-SAR Image Registration by Iterative Line Extraction and Voronoi Integrated Spectral Point Matching, *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, November 2015, Vol. 53, No. 11, pp. 6058-6072.
13. Guoping Zhang, Haigang Sui, Zhina Song, Feng Hua, Li Hua. Automatic Registration Method of SAR and Optical Image Based on Line Features and Spectral Graph Theory, *2nd International Conference on Multimedia and Image Processing*, 2017, pp. 64-67.
14. Bin Fan, Chunlei Huo, Chunhong Pan, Qingqun Kong. Registration of Optical and SAR Satellite Images by Exploring the Spatial Relationship of the Improved SIFT, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, July 2013, Vol. 10, No. 4, pp. 657-661.
15. Qiuzhe Yu, Dawen Ni, Yuxuan Jiang, Yuxuan Yan, Jiachun An, Tao Sun. Universal SAR and optical image registration via a novel SIFT framework based on nonlinear diffusion and a polar spatial-frequency descriptor, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2021, Vol. 171, pp. 1-17.
16. Sourabh Paul, Umesh C. Pati. Automatic optical-to-SAR image registration using a structural descriptor, *IET Image Processing*, November 2019, Vol. 14, No. 1, pp. 62-73.
17. Zhaoxiang Zhang, Yuelei Xu, Qi Cui, Qing Zhou, Linhua Ma. Unsupervised SAR and Optical Image Matching Using Siamese Domain Adaptation, *IEEE Transaction on geoscience and remote sensing*, May 2022, Vol. 60.
18. Skolnik M. I. Radar handbook. 3rd ed. New-York: The McGraw-Hill Companies, 1327 p.
19. El-Darymli K., Gill E.W., Mcquire P., Power D. and Moloney C. Automatic Target Recognition in Synthetic Aperture Radar Imagery: A State-of-the-Art Review, *IEEE Access*, 2016, Vol. 4, pp. 6014-6058.
20. Kostrov V.V., Tolstov E.F. Problemy dstantsionnogo zondirovaniya Zemli s ispol'zovaniem kosmicheskikh RSA vysokogo razresheniya [Problems of remote sensing of the Earth using high-resolution space SAR], *VII Vserossiyskie Armandovskie chteniya: molodaya shkola. Murom 27–29 iyunya 2017 goda* [VII All-Russian Armandov Readings: young school. Murom, June 27–29, 2017], pp. 76-113.
21. Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction. 2nd ed. Springer Series in Statistics, 2009, 739 p.

Кулешов Сергей Викторович – Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук; e-mail: kuleshov@iias.spb.su; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: 88125083311 (доб. 1211); профессор РАН; д.т.н.; г.н.с.

Кваснов Антон Васильевич – Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук; e-mail: kvasnov.a@iias.spb.su; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: 88125083311 (доб. 1231); д.ф.-м.н.; в.н.с.

Зайцева Александра Алексеевна – Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук; e-mail: cher@iias.spb.su; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: 88125083311 (доб. 1231); к.т.н.; доцент; с.н.с.

Ронжин Андрей Леонидович – Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук; e-mail: ronzhin@iias.spb.su; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: 88125083311 (доб. 1111); профессор РАН; д.т.н.; профессор; г.н.с.

Kuleshov Sergey Viktorovich – St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences; e-mail: kuleshov@iias.spb.su; St. Petersburg, Russia; phone: +78125083311 (ext. 1211); professor RAS; dr. of eng. sc.; chief researcher.

Kvasnov Anton Vasilievich – St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences; e-mail: kvasnov.a@iias.spb.su; St. Petersburg, Russia; phone: +78125083311 (ext. 1231); dr. of phys. and math. sc.; leading researcher.

Zaytseva Alexandra Alekseevna – St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences; e-mail: cher@iias.spb.su; St. Petersburg, Russia; phone: +78125083311 (ext. 1231); cand. of eng. sc.; senior researcher.

Ronzhin Andrey Leonidovich – St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences; e-mail: ronzhin@iias.spb.su; St. Petersburg, Russia; phone: +78125083311 (ext. 1111); professor RAS; dr. of eng. sc.; professor; chief researcher.