

Труды МАИ. 2025. № 140
Trudy MAI. 2025. No. 140. (In Russ.)

Научная статья

УДК 004.923

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=184070>

EDN: <https://www.elibrary.ru/POAWWU>

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КООРДИНАТ ОБЪЕКТА ПО ЕГО ПОЛОЖЕНИЮ НА ДВУХ ПОЛУЧЕННЫХ С РАЗНЫХ РАКУРСОВ ИЗОБРАЖЕНИЯХ

Данил Леонидович Никифоров^{1✉}, Константин Николаевич Рысенков²

^{1,2}Летно-исследовательский институт имени М.М. Громова,

Жуковский, Московская область, Российская Федерация

¹nikiforov-danil1997@yandex.ru✉

Аннотация. В статье рассматривается возможность измерения местоположения объекта (летательного аппарата) методом триангуляции по паре изображений видеокадров, сделанных с двух позиций. Метод предлагается в качестве альтернативы существующим методам спутниковых навигационных измерений. Обосновывается необходимость применения данного метода. Описывается процедура триангуляции по двум изображениям измеряемого объекта, полученным с разных ракурсов. Дается методика, позволяющая оценить точность триангуляции по этому методу. Приводится описание и результаты проведенного эксперимента по оценке точности предложенного метода. Полученные результаты показывают, что метод может эффективно применяться в локальных зонах, размеры которых

определяются дальностью действия применяемых объективов и, как правило, не превышают одного километра. Предлагается использовать метод в качестве основы при разработке комплекса для проведения траекторных измерений движущихся объектов по двум записанным видеофильмам. Такой комплекс существенно расширил бы возможности применяемых в АО «ЛИИ им. М. М. Громова» оптико-электронных измерителей, улучшив их точностные характеристики в зонах проведения лётных экспериментов. Также, комплекс может являться автономным измерителем местоположения объекта. Компоненты, применяемые для создания комплекса, представлены в широком ассортименте.

Ключевые слова: оптико-электронные траекторные измерения, триангуляция по изображениям, триангуляция по видео, спутниковые навигационные системы, модель камеры с точечным отверстием

Для цитирования: Никифоров Д.Л., Рысенков К.Н. Определение пространственных координат объекта по его положению на двух полученных с разных ракурсов изображениях // Труды МАИ. 2025. № 140. URL:

Original article

DETERMINING THE SPATIAL COORDINATES OF AN OBJECT FROM ITS POSITION IN TWO IMAGES TAKEN FROM DIFFERENT ANGLES

Danil L. Nikiforov¹, **Constantin N. Rysenkov²**

Flight Research Institute named M.M. Gromov,
Zhukovsky, Moscow region, Russian Federation

¹nikiforov-danil1997@yandex.ru

Abstract. This article considers the feasibility of determining the location of an object from a pair of images as an alternative to existing methods. The necessity for such an alternative is due to the widespread use of signal jammers and spoofers in European part of Russian Federation, which makes it impossible to use satellite navigation systems for conducting trajectory measurements. The purpose of this article is to propose, describe and experimentally prove a method that will allow conducting trajectory measurements in areas where satellite navigation is not available. The proposed method is based on the pinhole camera model. To use it, it is necessary to calibrate the cameras and eliminate image distortions. Geodetic referencing of two camera locations and two reference points that fall within the intersection of the fields of view of both cameras is required to bring both cameras to a common world coordinate system. Methods are described that allow one to estimate the angular error of camera calibration and the linear error of determining the location of an object. An experiment was conducted to validate the proposed method. The obtained results show that the method can be used when geodetic level of accuracy is not required. It is proposed to use this method as a basis for developing a complex for conducting trajectory measurements of moving targets based on a pair of recorded videos. Such a complex would significantly reduce the costs of trajectory measurements due to the use of components that are widely available both in price and range.

Keywords: optical-electronic trajectory measurements, image triangulation, video triangulation, satellite navigation systems, pinhole camera model

For citation: Nikiforov D.L., Rysenkov C.N. Determining the spatial coordinates of an object from its position in two images taken from different angles. *Trudy MAI*. 2025. No. 140. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=184070>

Введение

Основным методом определения местоположения летательного аппарата в пространстве является использование систем спутниковой навигации. В последние годы возникла необходимость постановки помех сигналам спутников глобальной системы позиционирования, поэтому в значительной части пространства Российской Федерации применение спутниковых навигационных систем для точных определений местоположения стало невозможным [1].

По данным сервиса GPSJam, который отслеживает проблемы с GPS-сигналом у самолетов, наибольшие проблемы наблюдаются в крупных областных центрах и на критически важных государственных объектах, таких как аэродромы. На рисунке 1 можно наблюдать насколько масштабна проблема сбоев в навигации. Красным выделяется территория, пролетая над которой более 10% самолетов за сутки сообщили о сбоях в работе навигационного оборудования, желтым — от 2 до 10%, зеленым — менее 2%.

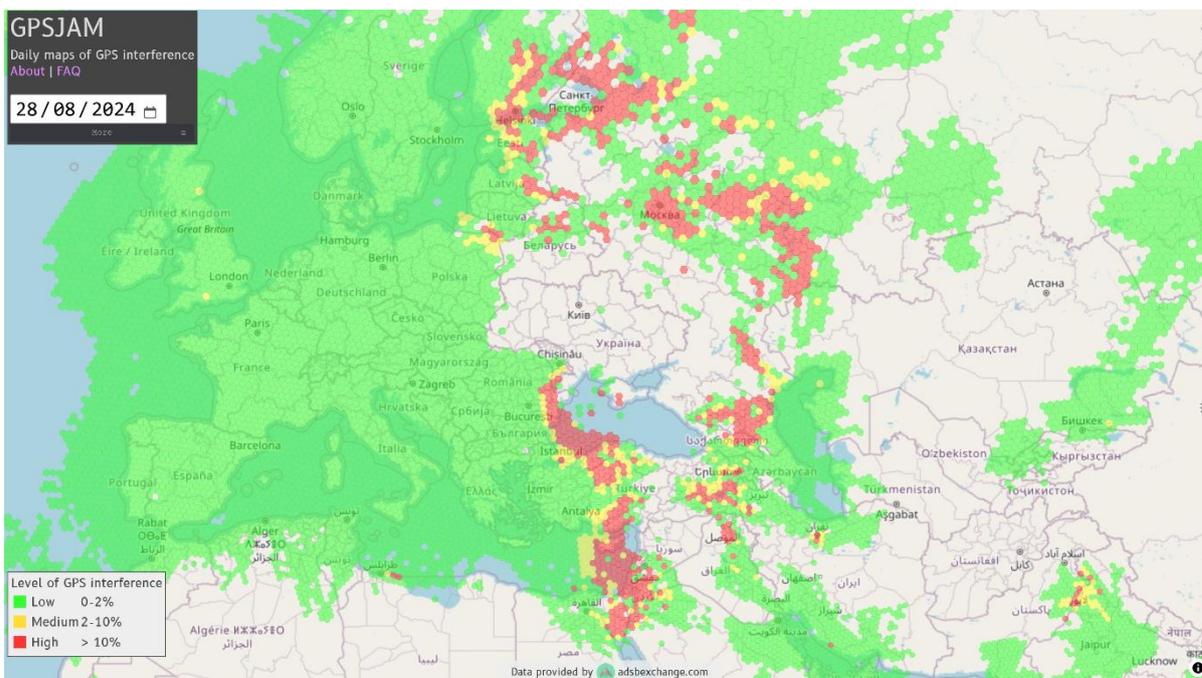


Рис. 1. Области помех сигнала GPS

В связи с вышеизложенным, использование глобальных спутниковых систем позиционирования для проведения траекторных измерений на территории аэродромов, расположенных в европейской части России, в настоящее время невозможно, что делает разработку устойчивых к помехам систем траекторных измерений актуальной задачей.

Обзор существующих подходов

Для точного определения местоположения летательного аппарата (ЛА) в пространстве применяются инерциальные навигационные системы (ИНС) с коррекцией по сигналам глобальной системы позиционирования [2]. Уточнение траектории движения ЛА осуществляется, как правило, в послеполётной обработке траекторной информации с учётом дифференциальных поправок от базовой

станции. Точность измерений координат местоположения в этом режиме не хуже 0,3 м.

В условиях помех в каналах СНС, при отсутствии связи со спутниками, ИНС быстро накапливают ошибку по курсовому углу, и их данные по местоположению ЛА становятся неприемлемыми для использования в лётном эксперименте [3; 4]. Применение помехозащищённых спутниковых антенн зависит от уровня помехи и не всегда решает задачу точного позиционирования.

Определение взлётно-посадочных характеристик ЛА, характеристик шума или звукового удара на местности требуют измерений траектории движения испытываемого ЛА в локальных зонах, находящихся в районе аэродрома или полигона. Размеры зоны измерений в таких случаях не превышают 5-10 км в плановых координатах и по высоте. Траекторные измерения высокой точности в зоне таких размеров успешно реализуются двухпунктным методом угловых засечек.

В Лётно-исследовательском институте имени М. М. Громова (ЛИИ) для проведения траекторных измерений применяются оптико-электронные системы (ОЭС) «Опал» и «Янтарь» [5]. Однако, в связи с тем, что они выработали свой ресурс, существует высокая вероятность выхода из строя их компонентов. Поскольку данные системы являются импортными, то их ремонт может оказаться неоправданно дорогостоящим [6]. Помимо этого, данные системы являются стационарными, что позволяет проводить измерения только в определённой зоне.

В качестве альтернативы системе «Опал-Янтарь» в ЛИИ был разработан другой инструмент — Мобильный Оптический Комплекс Измерительный (МОК-И)

[7–9]. Однако МОК-И может считаться мобильным лишь относительно стационарных систем. Для его транспортировки требуется грузовое транспортное средство или использование прицепа. Для безопасной установки и размещения необходимо задействовать четырёх человек, а для проведения измерений требуется два оператора.

Точность определения местоположения ЛА методом угловых засечек существенно зависит от базового расстояния между измерителями и ориентации базового отрезка относительно положения ЛА и может принимать значения, отличающиеся больше, чем на порядок, в зависимости от соотношения сторон в пеленгационном треугольнике. Точные измерения возможны, если длина базы соизмерима с предполагаемыми дальностями до объекта измерений и условно перпендикулярна им.

Вместе с этим, проведение траекторных измерений методом засечек в масштабе реального времени в зоне эксперимента, требует подключения ОЭС-измерителей к локальной вычислительной сети. Возвышения над рельефом, такие как крыши зданий и сооружений, пригодные для размещения ОЭС-измерителей комплекса МОК-И, не оборудованы сетью Ethernet. Поэтому, несмотря на относительную мобильность, разместить измерительные ОЭС, исходя из условий наилучшей базовой геометрии, не удаётся.

В масштабе реального времени, в ходе лётного эксперимента, высокая точность измерений не требуется. Однако, для анализа результатов эксперимента,

математической обработки полученных данных, необходимо уточнение траектории движения ЛА.

Послеполётное уточнение траектории можно обеспечить при помощи неподвижных телевизионных камер с видеорегистрацией, установленных в зоне измерений в соответствии с оптимальной геометрией. Камеры должны быть синхронизированы по времени с измерителями МОК-И и между собой.

Оптический измерительный комплекс МОК-И, дополненный неподвижными телевизионными камерами с видеорегистрацией, может легко перестраиваться в соответствии с решаемыми задачами. В тех случаях, когда нет необходимости измерений в масштабе реального времени и не требуется изменение фокусного расстояния измерителей, комплекс камер с видеорегистрацией может функционировать как автономный измеритель. Например, определять координаты квадрокоптера-измерителя в каждый момент времени измерений диаграммы направленности бортовых антенн самолёта.

Существующие по теме научные работы в основном являются либо обзорными [10–13], либо предлагают использование достаточно сложного технического оборудования [14–17], приобретение и обслуживание которого требуют значительных финансовых затрат. Предлагаемая методика триангуляционных измерений при помощи камер с видеорегистрацией проста в реализации, результаты её применения подтверждены практическими работами и натурными экспериментами.

Метод измерений

Триангуляция по изображениям, полученным от двух неподвижных камер, осуществляется в следующем порядке.

1. С помощью библиотеки «OpenCV» выполняется калибровка камеры для определения её внутренних параметров. Результатом калибровки является математическая матрица внутренних параметров, позволяющая проецировать точки трёхмерного пространства в точки двумерной плоскости изображения, и коэффициенты дисторсии, позволяющие учесть радиальную дисторсию, обусловленную сферической формой линз объектива, и тангенциальную дисторсию, причиной которой служат неизбежные сдвиги и перекосы светочувствительной матрицы относительно оптической оси объектива.

Поскольку внутренние параметры камеры неизменны, калибровка выполняется для каждой камеры однократно. В основе калибровки лежит методика, описанная в [18; 19].

2. Осуществляется геодезическая привязка двух точек размещения камер, и ряда опорных точек (точек горизонтирования). Точность геодезической привязки существенно определяет точность метода, поэтому погрешность измерения геодезических координат точек не должна превышать 0,1 м.

Оборудование опорных точек является существенной частью метода. Положение опорных точек в кадре позволяет вычислить матрицу направляющих косинусов, преобразующую систему координат камеры в расчётную систему координат. Такой подход позволяет устанавливать измерительные камеры

произвольно без выравнивания по горизонту и по линии отвеса, а также без привязки к меридиану (Северу).

В сектор обзора каждой камеры должны попадать две опорные точки. Эти две точки могут быть общими, т. е. находиться в зоне видимости обеих камер, что минимизирует работы по геодезическим привязкам.

3. Одна из камер произвольно выбирается главной. Точка её размещения принимается за начало координат прямоугольной топоцентрической системы, в которой проводится расчёт местоположения измеряемого объекта (далее — расчётная система). В расчётной системе ось X направлена на восток, ось Y — на север, ось Z — по линии отвеса вверх. Осуществляется перевод координат точек размещения второй камеры и опорных точек из геодезической системы в расчётную. Перевод осуществляется с помощью библиотеки «PyMap3D».

4. Вычисляются матрицы направляющих косинусов, позволяющие выполнить поворот произвольно ориентированных в пространстве координатных систем каждой камеры в расчётную систему, являющуюся общей для обеих камер.

4.1. С помощью библиотеки «OpenCV», по результатам калибровки, устраняются искажения изображения в кадре каждой камеры.

4.2. На исправленном изображении кадра каждой камеры определяются координаты опорных точек в кадре, в пикселях изображения. Согласно модели камеры с точечным отверстием [20], на эти точки вычисляются направляющие векторы. Эти векторы отсчитываются от сориентированной произвольно оптической оси камеры, по изображению которой они были вычислены.

4.3. Геодезически привязанные координаты опорных точек, выраженные в расчётной системе, и вычисленные ранее направляющие векторы приводятся к единичным векторам (нормализуются). С их помощью, для каждой камеры вычисляется матрица поворота, преобразующая координатную систему камеры в расчётную систему. Методика вычислений описана в [21].

5. Проводятся триангуляционные вычисления местоположения объекта по каждой паре синхронизированных по времени кадров камер.

5.1. Исправляются искажения изображения кадров каждой камеры.

5.2. На исправленном изображении кадра определяются координаты объекта в пикселях и вычисляется направляющий вектор на объект.

5.3. Осуществляется поворот направляющего вектора умножением его на вычисленную ранее матрицу поворота для данной камеры, что приводит направляющий вектор к единой для обеих камер расчётной системе координат.

5.4. Для каждой камеры задаётся прямая линия, определяемая в расчётной системе координат точкой установки камеры и направляющим на цель вектором. Вычисляются ближайшие точки между двумя заданными скрещивающимися прямыми. Середина отрезка, образованного между вычисленными точками, принимается за местоположение цели. Длина отрезка характеризует точность прицеливания по объекту.

Оценка точности предлагаемого метода

Для оценки точности предлагаемого метода был проведён эксперимент, в ходе которого местоположения точек, полученные с помощью высокоточной

измерительной аппаратуры, сравнивались с местоположениями, полученными в результате применения предложенного метода.

На площадке размером 20 м × 30 м было оборудовано измерительное поле, где с высокой точностью были геодезически привязаны 11 точек. Две из них являлись точками установки камер, а остальные девять — контрольными, по которым производилось сравнение. Координаты привязанных точек в расчётной системе приведены в таблице 1.

Таблица 1. Координаты точек измерительного поля в расчётной системе (в метрах)

№ точки	X	Y	Z
Точки размещения камер			
1	0.000	0.000	0.000
2	-3.967	8.207	-0.040
Контрольные точки			
1	-31.529	-0.917	-3.092
2	-26.721	1.462	-3.102
3	-27.908	-3.507	-3.782
4	-23.682	-3.355	-3.712
5	-20.621	-9.801	-3.712
6	-23.562	-12.206	-3.752
7	-23.470	-17.046	-3.062
8	-16.380	-13.598	-3.082
9	-35.262	-9.105	0.534

Геодезическая привязка точек измерительного поля осуществлялась методом спутниковой навигации с дифференциально-фазовой коррекцией (режим RTK), с точностью определения местоположения неподвижных объектов около 2–3 см. При отсутствии возможности использования спутниковых систем, геодезическую

привязку точек измерительного поля можно осуществить с помощью теодолита методом решения прямой геодезической задачи. Для дополнительного визуального контроля правильности привязки, положение точек на местности было представлено на интерактивной карте (рис. 2).



Рис. 2. Расположение камер и контрольных точек на измерительном поле

Для более надёжного определения контрольных точек на изображении кадра, в качестве контрольных точек 1–8 были приняты вершины расставленных по измерительному полю конусов. В качестве контрольной точки 9 была принята антенна базовой станции измерительного оборудования, с помощью которого осуществлялась геодезическая привязка точек.

При проведении эксперимента использовалась одна камера, поскольку обеспечение синхронизации по времени при съёмке с двух точек не требовалось, так как снимаемая сцена оставалась статичной. Сначала был сделан снимок с одной точки, затем — со второй. Съёмка производилась на ultrawide камеру смартфона Samsung Galaxy S23+ с фиксированным фокусным расстоянием.

Поскольку используемая камера обладает широким углом обзора (около 120°), измерительное поле на снимках занимает лишь малую их часть (примерно 5%). На представленных на рисунке 3 снимках обрезаны участки, которые не представляют интереса. При этом координаты точек в плоскости изображения определяются по необрезанным снимкам.

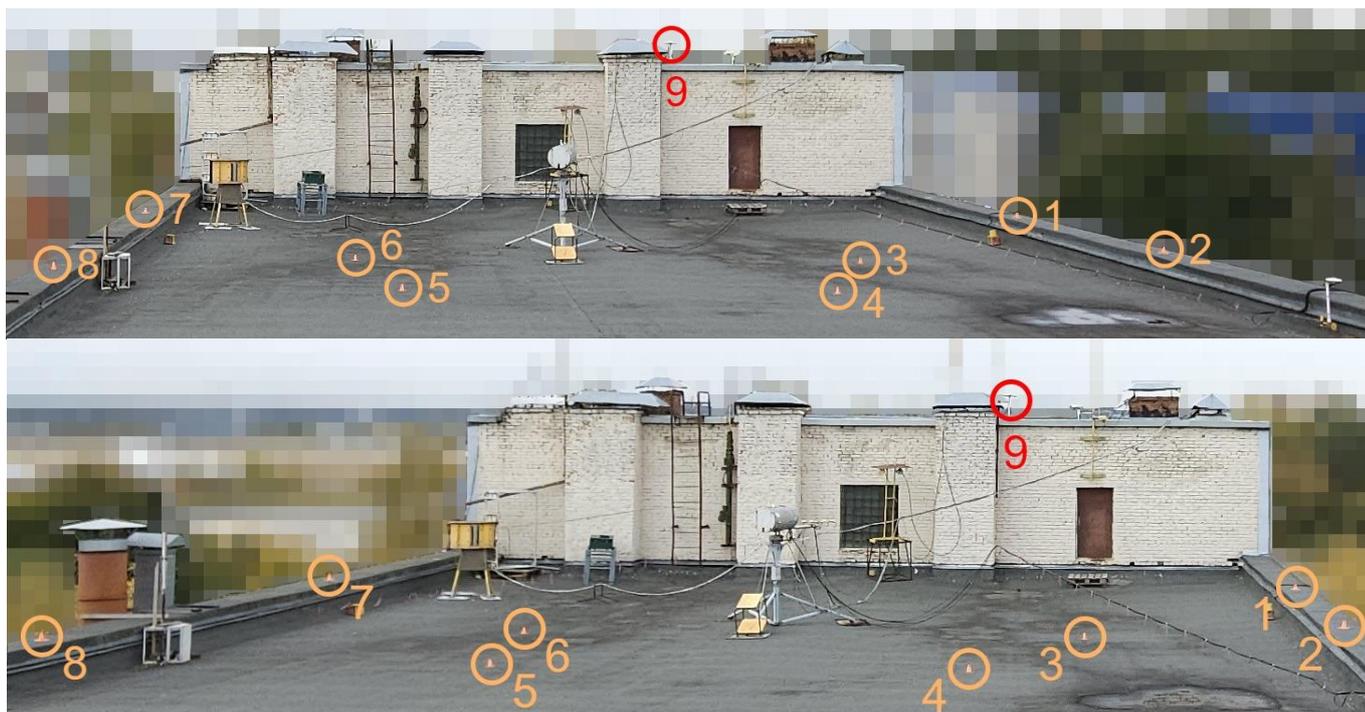


Рис. 3. Снимки измерительного поля с двух ракурсов

Точность предложенного метода определения местоположения по изображениям напрямую связана с точностью измерения углов по каждому из изображений. Для оценки точности угловых определений по изображению сравнивались результаты, полученные двумя способами вычисления углов, при которых вершиной угла является точка установки камеры, а сторонами — направления на контрольные точки, попадающие в кадр.

Первый способ (эталонный) заключается в вычислении углов по точно известным в расчётной системе координатам контрольных точек через скалярное или векторное произведение.

Второй способ заключается в вычислении углов (так же через скалярное или векторное произведение) между направляющими векторами на контрольные точки, вычисленными с помощью полученной в результате калибровки матрицы внутренних параметров камеры.

В таблице 2 приведены углы между всеми парами контрольных точек измерительного поля, вычисленные двумя вышеописанными способами. Ошибка определения углов вычислялась как разница между полученными результатами. Результатом оценки точности угловых измерений по изображениям является среднеквадратическая ошибка, которая дана внизу таблицы.

Таблица 2. Оценка точности калибровки камеры (в градусах)

Точки	Снимок 1			Снимок 2		
	Угол между точками по спутнику	Угол между точками по изображению	Ошибка	Угол между точками по спутнику	Угол между точками по изображению	Ошибка
[1, 2]	4.877	4.848	-0.028	2.244	2.181	-0.063
[1, 3]	5.836	5.861	0.025	7.952	7.970	0.019
[1, 4]	7.118	7.085	-0.033	12.368	12.359	-0.009
[1, 5]	23.830	23.829	-0.001	28.792	28.823	0.031
[1, 6]	25.651	25.653	0.002	27.698	27.707	0.008
[1, 7]	34.145	34.197	0.052	33.836	33.862	0.026
[1, 8]	37.834	37.844	0.011	41.762	41.760	-0.001
[1, 9]	14.324	14.352	0.028	12.675	12.708	0.034
[2, 3]	10.268	10.311	0.043	9.497	9.512	0.016

Точки	Снимок 1			Снимок 2		
	Угол между точками по спутнику изображению		Ошибка	Угол между точками по спутнику изображению		Ошибка
[2, 4]	11.311	11.296	-0.015	13.847	13.830	-0.017
[2, 5]	28.395	28.390	-0.004	30.446	30.460	0.014
[2, 6]	30.297	30.292	-0.005	29.407	29.397	-0.010
[2, 7]	38.879	38.918	0.039	35.630	35.632	0.002
[2, 8]	42.483	42.488	0.005	43.481	43.462	-0.019
[2, 9]	19.090	19.079	-0.011	14.913	14.886	-0.027
[3, 4]	1.465	1.442	-0.023	4.417	4.391	-0.026
[3, 5]	18.128	18.081	-0.047	20.949	20.948	-0.001
[3, 6]	20.036	19.987	-0.049	19.921	19.895	-0.027
[3, 7]	28.663	28.655	-0.008	26.190	26.174	-0.016
[3, 8]	32.219	32.181	-0.038	33.993	33.958	-0.035
[3, 9]	11.201	11.115	-0.086	9.363	9.291	-0.072
[4, 5]	17.147	17.156	0.009	16.658	16.693	0.034
[4, 6]	19.128	19.136	0.008	15.703	15.714	0.011
[4, 7]	27.826	27.874	0.048	22.064	22.086	0.022
[4, 8]	31.281	31.302	0.021	29.739	29.743	0.004
[4, 9]	11.585	11.540	-0.045	10.148	10.106	-0.043
[5, 6]	2.276	2.278	0.002	1.481	1.501	0.019
[5, 7]	10.953	10.987	0.034	5.923	5.905	-0.018
[5, 8]	14.144	14.158	0.014	13.089	13.060	-0.029
[5, 9]	14.843	14.789	-0.054	20.521	20.499	-0.023
[6, 7]	8.774	8.810	0.036	6.448	6.455	0.007
[6, 8]	12.188	12.197	0.009	14.074	14.065	-0.009
[6, 9]	15.641	15.589	-0.052	19.118	19.073	-0.045
[7, 8]	4.292	4.215	-0.078	8.121	8.081	-0.040
[7, 9]	22.547	22.563	0.016	24.182	24.165	-0.017
[8, 9]	26.728	26.679	-0.049	32.292	32.232	-0.059
	Средняя абсолютная:		0.029			0.024
	Среднеквадратическая:		0.036			0.029

	Снимок 1		Снимок 2	
Точки	Угол между точками по спутнику	Ошибка изображения	Угол между точками по спутнику	Ошибка изображения
	Максимальная абсолютная:	0.086		0.072

По результатам оценки видно, что среднеквадратическая ошибка определения углов по снимку не превышает угловую ошибку, обусловленную ошибкой геодезической привязки контрольных точек, которая составляет 0.05° на расстоянии 30 м между камерой и контрольной точкой. Следовательно, качество калибровки камер по примененному алгоритму является безусловно приемлемым для осуществления угловых измерений по изображению.

Матрицы поворота для каждого снимка вычислялись по принятым в качестве опорных точкам 3 и 6 измерительного поля. Поскольку ошибка определения их координат стремится к нулю, эти точки были исключены из расчёта статистики, так как учёт их значений мог привести к лучшей, чем в реальности, оценке общей точности измерений.

Оценка точности определения местоположения приведена в таблице 3. В качестве эталонных (с которыми производится сравнение) координат контрольных точек, приняты координаты, полученные высокоточным измерительным оборудованием (по спутнику). С эталонными сравнивались координаты контрольных точек, вычисленные с помощью предложенного метода триангуляции (по снимкам). Все координаты в таблице приведены в расчётной системе. За ошибку определения местоположения контрольной точки принята длина отрезка, образованного точкой, представленной эталонными координатами и точкой, представленной координатами,

полученными с использованием предложенного метода. Результирующая ошибка измерений предложенным методом для данной геометрии триангуляции дана как среднеквадратическая по всем точкам измерительного поля.

Таблица 3. Оценка точности определения местоположения контрольных точек измерительного поля предложенным методом (в метрах)

№ точки	По спутнику			По снимкам			Ошибка
	X	Y	Z	X	Y	Z	
1	-31.529	-0.917	-3.092	-31.483	-0.874	-3.134	0.076
2	-26.721	1.462	-3.102	-26.664	1.491	-3.106	0.064
3*	-27.908	-3.507	-3.782	-27.907	-3.507	-3.782	0.000
4	-23.682	-3.355	-3.712	-23.661	-3.328	-3.718	0.035
5	-20.621	-9.801	-3.712	-20.591	-9.786	-3.710	0.034
6*	-23.562	-12.206	-3.752	-23.562	-12.206	-3.752	0.000
7	-23.470	-17.046	-3.062	-23.506	-17.110	-3.078	0.076
8	-16.380	-13.598	-3.082	-16.396	-13.628	-3.058	0.041
9	-35.262	-9.105	0.534	-35.229	-9.081	0.496	0.055
Средняя абсолютная ошибка:							0.054
Среднеквадратическая ошибка:							0.057
Максимальная ошибка:							0.076

* Опорные точки не учитывались в статистике

Полученные результаты показывают состоятельность предложенного метода. Несмотря на то, что предложенный метод обеспечивает точность хуже, чем метод спутниковой навигации с дифференциально-фазовой коррекцией, он может найти своё применение для траекторных измерений в локальных зонах в условиях постановки помех сигналам спутников глобальной системы позиционирования. Следовательно, разработка измерительного комплекса, позволяющего осуществлять

измерение траектории движущегося объекта по кадрам записанных видео, является актуальной.

Анализ точности определения местоположения методом триангуляции требует рассмотрения геометрического фактора, который является определяющим для результирующей ошибки триангуляционных измерений.

На рисунке 4 приведены значения ошибок геометрического фактора в зоне измерительного поля, где проводились триангуляционные измерения по изображению в кадре. Вычисление проводилось при помощи программы «Вычисление зон равных точностей» [22].

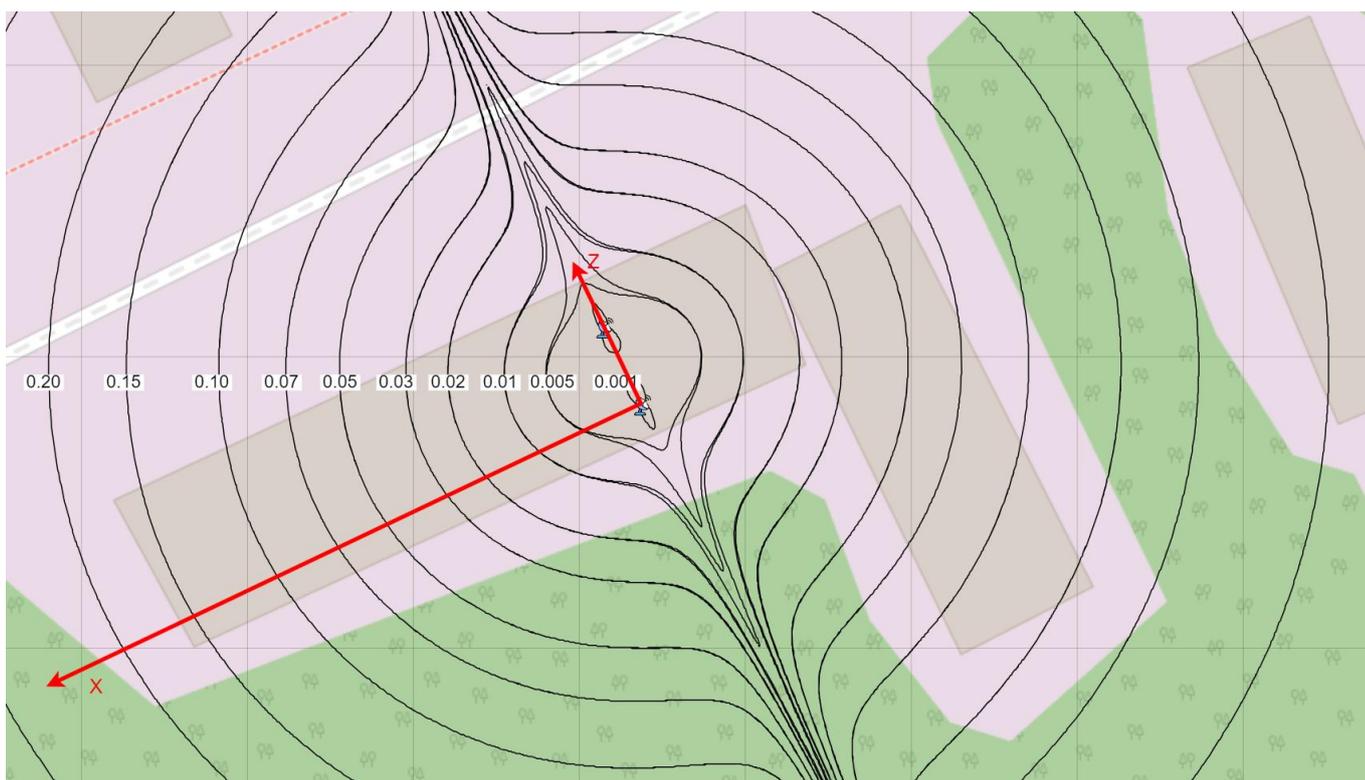


Рис. 4. Составляющая ошибки по оси x (в метрах) в локальной зоне измерительного поля. Инструментальная погрешность измерителей равна 0.05 угл. град.

Представлена только составляющая ошибки по оси x как наиболее значительная по величине. Значение инструментальной ошибки измерителей полагалось равным 0.05 угловых градусов.

Из рассмотрения видно, что значение ошибки геометрического фактора практически не отличается от ошибки метода в таблице 3, полученной сравнением эталонных координат контрольных точек с измеренными методом триангуляции по изображению кадра. Учитывая, что точность эталонных измерений в эксперименте составила 0.05° , а ошибка триангуляционных измерений с учётом геометрического фактора не превысила эталонной, можно сделать вывод, что ошибка определения углов в предложенном методе триангуляционных измерений существенно меньше, чем 0.05° .

Заключение

Результаты проведённых экспериментов хорошо соответствуют расчётам и позволяют сделать следующие выводы:

1. Для проведения измерений местоположения объекта (летательного аппарата) в локальных зонах, размерами порядка $1 \text{ км} \times 1 \text{ км}$, может применяться предложенный метод триангуляции с использованием неподвижных телевизионных камер с видеорегистрацией.

2. Предложенный метод является альтернативным методу спутниковых измерений в случае невозможности применения последнего.

3. Метод может применяться при комплексировании [23] с измерениями ОЭС на поворотных платформах для уточнения параметров движения объекта при послеполётной (вторичной) обработке результатов лётного эксперимента.

4. Освоение технологий триангуляционных измерений с применением неподвижных видеокамер с регистрацией даёт возможность проводить траекторные измерения в локальных зонах, таких как взлётно-посадочная полоса, вертолётная площадка, зона полёта квадрокоптера-измерителя [24] вблизи измеряемого летательного аппарата на стоянке, зоны морских и речных портов, шлюзов.

Результаты проведённого исследования являются основой для разработки мобильного, легко адаптируемого под решаемую задачу комплекса оптических триангуляционных измерений с применением неподвижных видеокамер с регистрацией.

Недостатком такого комплекса будет являться трудоёмкость послеполётной обработки, осуществляемой в ручном режиме. Целесообразно проведение дальнейших исследований по автоматизации данного процесса [25].

Список источников

1. Ольберг П.А. Ахтямова И.М., Караулова О.А., Прошечкина Н.В. Gps-спуфинг и способы защиты от него // VIII Международная научно-практическая очно-заочная конференция «Проблемы и перспективы внедрения инновационных телекоммуникационных технологий» (Оренбург, 25 марта 2022): сборник трудов. – Оренбург: Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2022. С. 130-138.

2. Сенцов А.А., Коротков В.А., Иванов С.А., Турнецкая Е.Л. Математическое моделирование бесплатформенной инерциальной навигационной системы для бортовых радиолокационных станций // Труды МАИ. 2023. № 131. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=175926>. DOI: [10.34759/trd-2023-131-20](https://doi.org/10.34759/trd-2023-131-20)
3. Jekeli C. Inertial navigation systems with geodetic applications. Walter de Gruyter GmbH & Co KG, 2023. 424 p.
4. Britting K.R. Inertial navigation systems analysis. Wiley-Interscience, 2010. 249 p.
5. Додонов А.Г., Пуятин В.Г. Наземные оптические, оптико-электронные и лазерно-телевизионные средства траекторных измерений // Математические машины и системы. 2017. № 4. С. 30-56.
6. Потоцкий С.В. Математическая постановка задачи для комплекса методик пространственно-углового определения координат объектов испытаний // 2-я Всероссийская научно-практическая конференция "Проблемы повышения эффективности научной работы в оборонно-промышленном комплексе России" (Знаменск, 11–12 апреля 2019): сборник трудов. – Знаменск: Издательский дом «Астраханский университет», 2019. С. 91-97.
7. Деревнин С.В., Рысенков К.Н., Войченко О.С. и др. Реализация метода триангуляции с применением горизонтирования по опорным точкам на территории АО «ЛИИ им. М.М. Громова» // XI Международная юбилейная научно-техническая конференция «Проблемы совершенствования робототехнических и интеллектуальных систем летательных аппаратов» (Москва, 10–11 декабря 2020): сборник докладов. - М.: Эдитус, 2021. С. 231-234.

8. Рысенков К.Н., Войченко О.С., Зобов И.С. и др. Способ коррекции углов визирования на точку. Патент RU 2 758 860 С1, опубл. 2021.11.02
9. Зобов И.С., Рысенков К.Н., Войченко О.С. и др. Горизонтирование измерительного прибора по двум реперным точкам // XI Международная юбилейная научно-техническая конференция «Проблемы совершенствования робототехнических и интеллектуальных систем летательных аппаратов» (Москва, 10–11 декабря 2020): сборник докладов. - М.: Эдитус, 2021. С. 226-230.
10. Фатеев Ю.Л., Тяпкин В.Н., Дмитриев Д.Д. и др. Пеленгационный метод измерения углов пространственной ориентации по сигналам ГНСС // Решетневские чтения. 2016. Т. 1, № 20. С. 304-306.
11. Спивак И.А., Хохлов В.А., Комаров В.Г. Направления совершенствования средств траекторных измерений оптико-электронного типа // Научные труды Высшей школы машиностроения. Сборник статей. - Санкт-Петербург: Политех-Пресс, 2022. С. 52-57.
12. Кириченко А.Ф. Современные наследящие оптические средства траекториях измерений // Матрица научного познания. 2021. Т. 1, № 6. С. 96-101.
13. Митрофанов И.В., Волотов Е.М., Ефимов Н.А. Определение траекторных параметров авиационной техники, полученных по материалам видеорегистрации. – М.: Изд-во МАИ, 2018. – 68 с.
14. Бугаков И.А., Ванюшин В.М., Орловский В.М. Алгоритм траекторных измерений угломерными измерителями на подвижных платформах // Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий

(РЭУС-ИТ 2023), Москва, 07–09 июня 2023. – М.: Российское научно-техническое общество радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова, 2023. С. 109-113.

15. Митрофанов Е.И., Волотов Е.М., Ефимов Н.А., Митрофанов И.В. Система обработки информации материалов видеорегистрации при испытаниях образцов авиационной техники и вооружения // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество». - Пенза: Пензенский государственный университет, 2014. Т. 2. С. 10-15.

16. Hamid Didari, Hamid D. Taghirad, F. Lotfi. Position Estimation for Drones based on Visual SLAM and IMU in GPS-denied Environment // 2019 7th International Conference on Robotics and Mechatronics (ICRoM). Tehran, Iran: IEEE, 2019. P. 120-124. DOI: [10.1109/ICRoM48714.2019.9071826](https://doi.org/10.1109/ICRoM48714.2019.9071826)

17. Hyunho Kang, Sangsu Lee, Choon Ki Ahn. Camera Position Estimation for UAVs Using SolvePnP with Kalman Filter // 2018 1st IEEE International Conference on Hot Information-Centric Networking (HotICN). Shenzhen, China: IEEE, 2018. P. 250-251. DOI: [10.1109/HOTICN.2018.8606037](https://doi.org/10.1109/HOTICN.2018.8606037)

18. Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2000. V. 22, No. 11. P. 1330-1334. DOI: [10.1109/34.888718](https://doi.org/10.1109/34.888718)

19. OpenCV: Camera Calibration. URL: https://docs.opencv.org/5.x/dc/dbb/tutorial_py_calibration.html

20. Sturm P. Pinhole Camera Model. Computer Vision: A Reference Guide / ed. K. Ikeuchi. Cham: Springer International Publishing, 2021. P. 983-986. DOI: [10.1007/978-0-387-31439-6_472](https://doi.org/10.1007/978-0-387-31439-6_472)
21. Savage P.G. Strapdown analytics. Vol. 1. Maple Plain, Minnesota: Strapdown Associates, 2007. 836 p.
22. Никифоров Д.Л., Рысенков К.Н., Деревнин С.В., Зобов И.С. Программа вычисления зон равных точностей для двухпунктного пеленгационного способа измерений. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ RU 2023615670, опубл. 16.03.2023.
23. Овакимян Д.Н., Зеленский В.А., Капалин М.В., Ерескин И.С. Исследование методов и разработка алгоритмов комплексирования навигационной информации // Труды МАИ. 2023. № 132. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=176849>
24. Коровин А.В., Савин Д.И. Способ определения координат наземных объектов беспилотным летательным аппаратом с использованием лазерного дальномера // Труды МАИ. 2023. № 128. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=171398>. DOI: [10.34759/trd-2023-128-14](https://doi.org/10.34759/trd-2023-128-14)
25. Черников А.А. Алгоритм обнаружения и классификации объектов на неоднородном фоне для оптико-электронных систем // Труды МАИ. 2023. № 129. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=173039>. DOI: [10.34759/trd-2023-129-26](https://doi.org/10.34759/trd-2023-129-26)

References

1. Ol'berg P.A. Akhtyamova I.M., Karaulova O.A., Proshechkina N.V. GPS-spoofing and ways to protect against it. *VIII Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya ochno-*

zaochnaya konferentsiya «Problemy i perspektivy vnedreniya innovatsionnykh telekommunikatsionnykh tekhnologii» (Orenburg, March 2022). Orenburg: Povolzhskii gosudarstvennyi universitet telekommunikatsii i informatiki Publ., 2022. P. 130-138.

2. Sentsov A.A. Korotkov V.A., Ivanov S.A., Turnetskaya E.L. Mathematical modeling of a free form inertial navigation system for airborne radar stations. *Trudy MAI*. 2023. No. 131. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=175926>. DOI: [10.34759/trd-2023-131-20](https://doi.org/10.34759/trd-2023-131-20)

3. Jekeli C. *Inertial navigation systems with geodetic applications*. Walter de Gruyter GmbH & Co KG, 2023. 424 p.

4. Britting K.R. *Inertial navigation systems analysis*. Wiley-Interscience, 2010. 249 p.

5. Dodonov A.G., Putyatin V.G. Ground-based optical, optoelectronic and laser-television tools of trajectory measurements. *Matematicheskie mashiny i sistemy*. 2017. No. 4. P. 30-56. (In Russ.)

6. Pototskii S.V. Mathematical formulation of the problem for a set of techniques for spatial-angular determination of the coordinates of test objects. *2-ya Vserossiiskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya "Problemy povysheniya effektivnosti nauchnoi raboty v oboronno-promyshlennom komplekse Rossii"* (Znamensk, April 2019): sbornik trudov. Znamensk: Izdatel'skii dom «Astrakhanskii universitet» Publ., 2019. P. 91-97.

7. Derevnin S.V. Rysenkov K.N., Voichenko O.S. ets. Implementation of the triangulation method using leveling by reference points on the territory of JSC "Gromov Flight Research Institute". *XI Mezhdunarodnaya yubileinaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya «Problemy sovershenstvovaniya robototekhnicheskikh i intellektual'nykh*

sistem letatel'nykh apparatov» (Moscow, December 2020): sbornik dokladov. Moscow: Editus Publ., 2021. P. 231-234.

8. Rysenkov K.N., Voichenko O.S., Zobov I.S. ets. *Sposob korrektsii uglov vizirovaniya na tochku. Patent RU 2758860 C1 (Method for correcting the angles of sight to a point. Patent RU 2758860 C1).* opubl. 2021.11.02

9. Zobov I.S., Rysenkov K.N., Voichenko O.S. ets. Leveling the measuring instrument using two reference points. *XI Mezhdunarodnaya yubileinaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya «Problemy sovershenstvovaniya robototekhnicheskikh i intellektual'nykh sistem letatel'nykh apparatov» (Moscow, December 2020): sbornik dokladov. Moscow: Editus Publ., 2021. P. 226-230.*

10. Fateev Yu.L., Tyapkin V.N., Dmitriev D.D. ets. *Df method of measuring the angles of spatial orientation of gnss signals. Reshetnevskie chteniya. 2016. V. 1, No. 20. P. 304-306. (In Russ.)*

11. Spivak I.A., Khokhlov V.A., Komarov V.G. Directions for improving optical-electronic trajectory measurement tools. *Nauchnye trudy Vysshei shkoly mashinostroeniya. Sbornik statei. Saint Petersburg: Politekh-Press Publ., 2022. P. 52-57.*

12. Kirichenko A.F. Modern non-tracking optical tools of trajectory measurements. *Matritsa nauchnogo poznaniya. 2021. V. 1, No. 6. P. 96-101. (In Russ.)*

13. Mitrofanov I.V., Volotov E.M., Efimov N.A. *Opredelenie traektornykh parametrov aviatsionnoi tekhniki, poluchennykh po materialam videoregistratsii (Determination of trajectory parameters of aircraft obtained from recorded video).* Moscow: Izd-vo MAI, Publ., 2018. 68 p.

14. Bugakov I.A., Vanyushin V.M., Orlovskii V.M. Algorithm of trajectory measurements by angle meters on mobile platforms. *Radioelektronnyye ustroystva i sistemy dlya infokommunikatsionnykh tekhnologii (REUS-IT 2023)* (Moscow, June 2023). Moscow: Rossiiskoe nauchno-tekhnicheskoe obshchestvo radiotekhniki, elektroniki i svyazi im. A.S. Popova Publ., 2023. P. 109-113.
15. Mitrofanov E.I., Volotov E.M., Efimov N.A., Mitrofanov I.V. A system for processing information from recorded video applicable to testing aircraft and weapons samples. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma «Nadezhnost' i kachestvo»*. Penza: Penzenskii gosudarstvennyi universitet Publ., 2014. V. 2, P. 10-15.
16. Hamid Didari, Hamid D. Taghirad, F. Lotfi. Position Estimation for Drones based on Visual SLAM and IMU in GPS-denied Environment. *2019 7th International Conference on Robotics and Mechatronics (ICRoM)*. Tehran, Iran: IEEE, 2019. P. 120-124. DOI: [10.1109/ICRoM48714.2019.9071826](https://doi.org/10.1109/ICRoM48714.2019.9071826)
17. Hyunho Kang, Sangsu Lee, Choon Ki Ahn. Camera Position Estimation for UAVs Using SolvePnP with Kalman Filter. *2018 1st IEEE International Conference on Hot Information-Centric Networking (HotICN)*. Shenzhen, China: IEEE, 2018. P. 250-251. DOI: [10.1109/HOTICN.2018.8606037](https://doi.org/10.1109/HOTICN.2018.8606037)
18. Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2000. V. 22, No. 11. P. 1330-1334. DOI: [10.1109/34.888718](https://doi.org/10.1109/34.888718)
19. *OpenCV: Camera Calibration.* URL: https://docs.opencv.org/5.x/dc/dbb/tutorial_py_calibration.html

20. Sturm P. *Pinhole Camera Model*. *Computer Vision: A Reference Guide* / ed. K. Ikeuchi. Cham: Springer International Publishing, 2021. P. 983-986. DOI: [10.1007/978-0-387-31439-6_472](https://doi.org/10.1007/978-0-387-31439-6_472)
21. Savage P.G. *Strapdown analytics*. Vol. 1. Maple Plain, Minnesota: Strapdown Associates, 2007. 836 p.
22. Nikiforov D.L., Rysenkov K.N., Derevnin S.V., Zobov I.S. *Programma vychisleniya zon ravnykh tochnostei dlya dvukhpunktного pelengatsionnogo sposoba izmerenii. Svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii programmy dlya EVM RU 2023615670*, (Program for calculating zones of equal accuracy for a two-point direction-finding method of measurements. Computer program registration certificate RU 2023615670), opubl. 16.03.2023.
23. Ovakimyan D.N., Zelenskii V.A., Kapalin M.V., Ereskin I.S. Research of methods and development of algorithms for integration of navigation information. *Trudy MAI*. 2023. No. 132. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=176849>
24. Korovin A.V., Savin D.I. The method for determining the coordinates of ground objects by an unmanned aerial vehicle using a laser rangefinder. *Trudy MAI*. 2023. No. 128. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=171398>. DOI: [10.34759/trd-2023-128-14](https://doi.org/10.34759/trd-2023-128-14)
25. Chernikov A.A. Algorithm for detecting and classification of objects on a unhomogeneous background for optoelectronic systems. *Trudy MAI*. 2023. No.129. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=173039>. DOI: [10.34759/trd-2023-129-26](https://doi.org/10.34759/trd-2023-129-26)

Статья поступила в редакцию 12.12.2024

Одобрена после рецензирования 23.12.2024

Принята к публикации 25.02.2025

The article was submitted on 12.12.2024; approved after reviewing on 23.12.2024;
accepted for publication on 25.02.2025