

Метод определения координат цифровых изображений фотограмметрических опорных знаков: разработка и оценка точности

Игорь Георгиевич Журкин¹, Григорий Геннадьевич Сычев²✉

^{1, 2} Московский государственный университет геодезии и картографии, Москва, Россия, ¹zhurkin@miigaik.ru,

²grisyshev@yandex.ru✉

Аннотация. Рассмотрена проблема обработки изображений, получаемых при дистанционном зондировании. Разработан метод автоматизированного измерения координат цифровых изображений центрально-симметричных искусственных объектов. Проанализирована применимость указанного метода в программных комплексах обработки изображений. Для реализации метода предложены два корреляционных алгоритма, позволяющих определить координаты центров изображений искусственных объектов с субпиксельной точностью. Исследовано влияние дискретной структуры растровых изображений на точность измерений. Рассчитаны погрешности измерения координат цифровых изображений. Описан эксперимент с использованием авторского программного обеспечения по автоматизированному определению координат центров изображений радиальных миш, полученных по материалам реальных съёмок. Эффективность предложенного метода подтверждена результатами эксперимента.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, фотограмметрия, цифровое изображение, погрешность измерения, субпиксельная точность, функция корреляции

Финансирование: работа выполнена в рамках государственного заказа 0708-220-0001 Министерства образования и науки России.

Для цитирования: Журкин И. Г., Сычев Г. Г. Метод определения координат цифровых изображений фотограмметрических опорных знаков: разработка и оценка точности // Измерительная техника. 2021. № 11. С. 19–23. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-11-19-23>

Method for determining the coordinates of digital images of photogrammetric reference signs: development and evaluation of accuracy

Igor G. Zhurkin¹, Grigory G. Sychev²✉

^{1, 2} Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia, ¹zhurkin@miigaik.ru, ²grisyshev@yandex.ru✉

Abstract. The method of automated measurement of coordinates of digital images of centrally symmetric artificial objects proposed by the authors is considered in order to analyze the possibility of its application in software complexes for processing images obtained by a remote sensing system. Two correlation algorithms are proposed for the implementation of the method that allows determining the coordinates of the centers of digital images of artificial objects with subpixel accuracy. The influence of the discrete structure of raster images on the measurement accuracy is investigated. Calculations of errors in measuring the coordinates of digital images are given. An experiment with the use of the author's software on automated determination of the coordinates of the centers of images of radial test-objects for measuring optical resolution obtained from real surveys is described, confirming the effectiveness of the proposed method.

Keywords: remote sensing, photogrammetry, digital image, measurement error, subpixel accuracy, correlation function

Financial Support: the work was carried out within the framework of the state order 0708-220-0001 of the Ministry of Education and Science of Russia.

Введение. Для сбора геопространственных данных о местности в настоящее время широко применяются беспилотные космические и воздушные системы. Аналоговые методы получения данных и их обработки повсеместно заменяются цифровыми. Указанные обстоятельства обуславливают развитие измерительной наземной инфраструктуры, обеспечивающей решение задач валидации, калибровки и координатно-временной привязки устанавливаемых на борт беспилотных летательных аппаратов средств дистанционного зондирования. Вопросы оценки качества цифровой аппаратуры, а также методы её калибровки рассматриваются, например, в статьях [1–3].

Одним из элементов, входящих в состав измерительной наземной инфраструктуры, является комплекс специально создаваемых искусственных наземных объектов (опорных знаков), например радиальных миш, выполняющих как функции тест-объектов для контроля оптических характеристик съёмочной системы, так и функции фотограмметрических опорных знаков и контрольных точек при построении цифровых ортофотопланов и цифровых моделей рельефа [4, 5]. При этом возникает задача измерения координат и оценки точности определения положения центров изображений опорных знаков на растре цифрового снимка. Определение точных

координат центра опорного знака осложняется тем, что в реальных условиях съёмки центр опорного знака часто плохо визуализируется вследствие недостаточного масштаба снимка, шумов изображения и дискретной структуры растрового изображения, что вызывает затруднения у оператора при нахождении центра даже с точностью до одного пиксела. Исследование влияния шумов изображений на точность субпиксельного измерения координат можно найти в [6].

Цель статьи – проанализировать влияние дискретной структуры растровых изображений на координатно-измерительные свойства цифровых изображений, разработать метод, алгоритмы и программное обеспечение для автоматизированного определения растровых координат центров опорных знаков с субпиксельной точностью и оценить среднее квадратическое отклонение (СКО) измерения координат на реальных снимках.

Метод определения координат центров опорных знаков.

Наибольшее распространение среди методов автоматизированного измерения координат точек на цифровых изображениях, в том числе с субпиксельной точностью, получили корреляционные методы. Например, в работах [7, 8] описаны методы определения координат объектов, размер изображения которых соизмерим с размерами пиксела. В рассматриваемом в настоящей статье случае размер изображения превышает размеры пиксела не менее чем на порядок. При этом центральная часть изображения может представлять собой размытое пятно в несколько пикселей. Предложенный метод определения координат центров опорных знаков основан на свойствах центральной симметрии изображений опорных знаков. Автоматическое определение координат центров изображений представляет собой поиск координат точки, в которой принимает максимальное значение коэффициент корреляции между точками, располагающимися центрально-симметрично относительно данной точки в окрестности предполагаемого положения центра опорного знака, причём размеры окрестности определяются размером изображения опорного знака.

Для всех точек изображения с координатами (x, y) в заданной области поиска вычисляется значение функции корреляции по формуле [9]:

$$r(x, y) = (\mathbf{V}_1(x, y), \mathbf{V}_2(x, y)) / [\|\mathbf{V}_1(x, y)\| \|\mathbf{V}_2(x, y)\|], \quad (1)$$

где $\mathbf{V}_1(x, y)$ – вектор, описывающий распределение оптического сигнала в окрестности точки (x, y) ; $\mathbf{V}_2(x, y)$ – вектор, аналогичный вектору $\mathbf{V}_1(x, y)$, отличающийся от последнего тем, что конфигурация расположения его соответствующих (имеющих равные номера) компонентов является центрально-симметричной относительно точки (x, y) по отношению к компонентам вектора $\mathbf{V}_1(x, y)$; внешние круглые скобки числителя обозначают скалярное произведение векторов, а двойные вертикальные скобки – евклидову норму вектора.

В качестве центра опорного знака выбирается точка, в которой значение $r(x, y)$ максимально.

Поиск центра изображения осуществляется в два этапа.

Этап 1 – поиск целочисленных координат точки (i_0, j_0) , соответствующих центрам пикселей растрового изображения, удовлетворяющих условию максимума функции (1) по всей окрестности поиска.

Этап 2 – поиск уточнённых координат (i_{0r}, j_{0r}) в пределах ± 1 пиксела от найденной целочисленной точки по каждой координате.

Алгоритмы и программное обеспечение для реализации метода определения координат центров опорных знаков. Используется два алгоритма поиска уточнённых координат. В каждом алгоритме применяется один и тот же указанный выше корреляционный критерий. Алгоритмы отличаются способами поиска точки максимума корреляционной функции, предполагающими необходимость интерполяции значений функции, которая описывает изображение в промежуточных (нецелочисленных) точках. Анализ различных методов субпиксельной интерполяции приведен в статьях [10, 11]. В настоящей работе используется билинейная интерполяция.

Алгоритм 1 заключается в прямом поиске максимума функции (1) в прямоугольной окрестности точки (i_0, j_0) от $(i_0 - 1, j_0 - 1)$ до $(i_0 + 1, j_0 + 1)$ с шагом 0,1 пиксела. Этот шаг можно уменьшать, однако увеличение точности более чем в 10 раз по сравнению с точностью до 1 пиксела для реальных изображений нецелесообразно, так как измерения на цифровых изображениях обычно производятся с точностью в один пиксел. Точка, в которой корреляция максимальна, принимается за центр изображения.

Алгоритм 2 строится на предположении, что корреляционная функция изображения выбранного опорного знака обладает круговой симметрией вблизи точки своего максимума. При этом симметричны и сечения этой функции любыми вертикальными плоскостями, в том числе и плоскостями, удовлетворяющими уравнениям $i = i_0, j = j_0$. Для этих плоскостей координаты максимумов сечений совпадают с координатами максимума двумерной корреляционной функции. По известным значениям корреляционной функции в целочисленных точках $r(i_0, j_0 - 1), r(i_0, j_0), r(i_0, j_0 + 1)$ находят уточнённое положение j_{0r} максимума симметричного сечения корреляционной функции плоскостью $i = i_0$, а по известным значениям $r(i_0 - 1, j_0), r(i_0, j_0), r(i_0 + 1, j_0)$ – уточнённое положение i_{0r} максимума симметричного сечения корреляционной функции плоскостью $j = j_0$. Найденные координаты (i_{0r}, j_{0r}) соответствуют уточнённому положению центра изображения. Быстродействие алгоритма 2 выше, чем у алгоритма 1 из-за отсутствия необходимости вычислять значения корреляционной функции для всех нецелочисленных точек.

Оценка погрешностей измерения координат на растровом изображении. Точность автоматического поиска положений центров опорных знаков определяется по результатам сравнения измеряемых значений расстояний между центрами тест-объектов на местности (так называемых «истинных величин») и значений расстояний, получаемых по цифровому изображению в режиме автоматизированного нахождения центров тест-объектов. Расстояния между центрами тест-объектов на местности измеряются

с погрешностью, значительно меньшей, чем проекция пиксела на местность, а расстояния, определяемые по цифровому изображению с помощью специального программного обеспечения, – с субпиксельной точностью.

При определении координат точек по растровому изображению в случае наведения маркера на требуемую точку погрешность измерения каждой координаты равна погрешности округления до целых пикселей. СКО каждой координаты составляет (в пикселах)

$$\sigma_x = \sigma_y = \sqrt{\int_{-1/2}^{1/2} x^2 dx} = \sqrt{1/12} \approx 0,289.$$

Суммарное СКО определения положения точки по двум координатам составляет (в пикселах)

$$\sigma_{xy} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2} = \sqrt{1/6} \approx 0,408.$$

Рассмотрим отрезок AB на растровом изображении. Введём следующие обозначения: $X_{0A}, Y_{0A}, X_{0B}, Y_{0B}$ – целочисленные координаты точек A, B в пикселах; $X_{00} = X_{0A} - X_{0B}, Y_{00} = Y_{0A} - Y_{0B}$ – разности целочисленных координат точек A, B ; X_A, X_B, Y_A, Y_B – отклонения измеренных координат с точностью до целых пикселей от истинных. Тогда истинное расстояние L_0 между точками A и B можно представить как функцию четырех переменных X_A, X_B, Y_A, Y_B :

$$L_0(X_A, X_B, Y_A, Y_B) = \sqrt{(X_{00} + X_B - X_A)^2 + (Y_{00} + Y_B - Y_A)^2}.$$

Средняя длина отрезков в пикселах между всеми парами точек двух квадратов размером один пиксел с центрами в точках (X_{0A}, Y_{0A}) и (X_{0B}, Y_{0B}) определяется формулой

$$\bar{L} = \int_{-1/2}^{1/2} \int_{-1/2}^{1/2} \int_{-1/2}^{1/2} \int_{-1/2}^{1/2} L_0(X_A, X_B, Y_A, Y_B) dX_A dX_B dY_A dY_B.$$

При измерении длины L отрезка AB на изображении СКО измерения вследствие равномерного распределения случайных координат концов отрезка в пределах пиксела определяется выражением

$$\sigma_L = \sqrt{\int_{-1/2}^{1/2} \int_{-1/2}^{1/2} \int_{-1/2}^{1/2} \int_{-1/2}^{1/2} [\bar{L} - L_0(X_A, X_B, Y_A, Y_B)]^2 dX_A dX_B dY_A dY_B}. \quad (2)$$

Как СКО σ_L , так и отклонение D_L средней длины от расстояния между центрами пикселей (среднее значение погрешности измерения), представляющее собой систематическую погрешность, зависят от расстояний L между точками A, B :

$$D_L = L_{00} - \bar{L} = \sqrt{X_{00}^2 + Y_{00}^2} - \bar{L}.$$

Проанализируем влияние длины отрезка на погрешности его измерения на растровом изображении. Для этого построим зависимости СКО и средней погрешности от длины L . Значения σ_L, D_L усредним по различным положениям отрезка AB относительно раstra при равномерном распределении его

смещения и углового положения для разных диапазонов расстояний L . На рис. 1, a приведены зависимости средних погрешностей измерения длины от расстояния между точками A, B в интервале расстояний $L = 1..5$ пикселей. При $L \geq 3$ пикселям СКО измерения длины за счёт округления до целых пикселей превышает среднюю погрешность более чем на порядок. Поэтому для реально определяемых расстояний среднюю погрешность можно не учитывать.

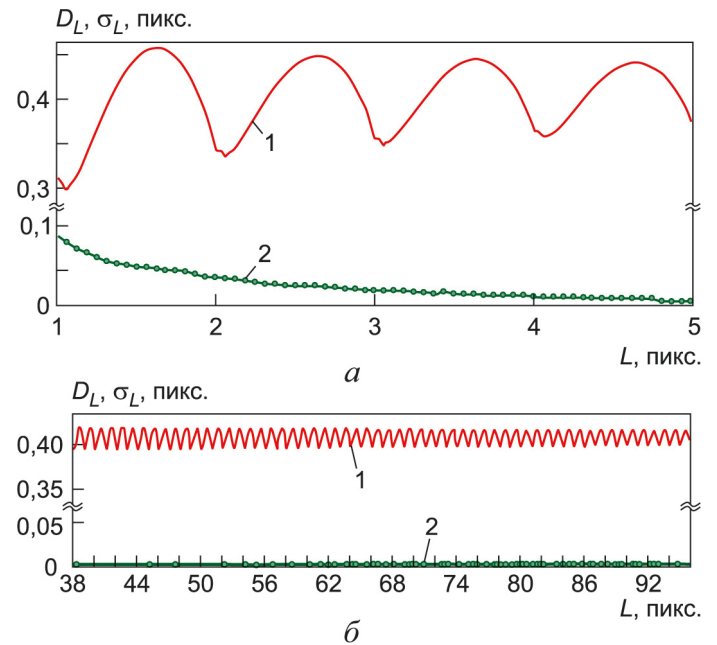


Рис. 1. Зависимости погрешностей измерения длины от расстояния L между точками A, B в интервалах 1–5 (a) и 38–96 (b) пикселей: 1 – СКО σ_L , 2 – средняя погрешность D_L

Fig. 1. The dependence of the errors in measuring the length in pixels on the distance between points A, B in the range from 1 to 5 pixels (a) and from 38 to 96 pixels (b): 1 – standard deviation σ_L , 2 – average error D_L

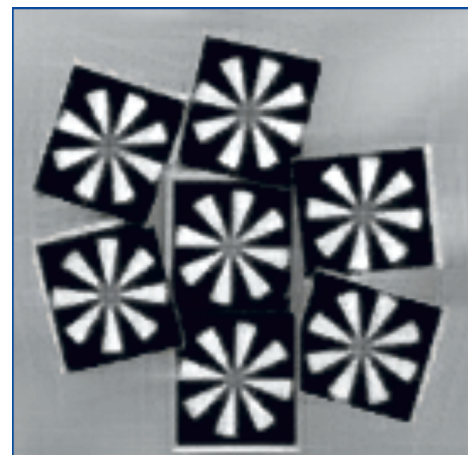


Рис. 2. Тест-объект со случайным расположением семи опорных знаков в виде радиальных мир

Fig. 2. Test object with a random arrangement of 7 reference signs

В экспериментах по автоматическому определению центров опорных знаков значения расстояний между центрами находились в диапазоне 38–96 пикселей. Погрешности для этого диапазона расстояний показаны на рис. 1, б. Здесь средняя погрешность практически совпадала с нулем, а СКО изменялось в зависимости от расстояния с периодом 1 пиксел и амплитудой около 0,01 пиксела, что более чем на порядок меньше среднего значения СКО. При этом СКО определения расстояния σ_L , вычисленное по формуле (2) для расстояний более 10 пикселей, оказалось приблизительно равным 0,408 пиксела, т. е. в $\sqrt{2}$ раз больше, чем СКО определения координат.

Таким образом, измерив координаты точек на изображении и вычислив расстояния между ними в пикселах, можно перейти к расстояниям в метрических единицах, и по множеству расстояний, оценив СКО измерения длин по изображению, найти СКО определения координат точек объекта.

Оценка СКО измерения координат на реальных снимках.

Для оценки точности определения координат использовали тест-объект со случайным расположением семи опорных знаков в виде радиальных мир (рис. 2) с измеренными с точностью до долей миллиметра расстояниями между их центрами. Расстояния между центрами мир приведены в табл. 1.

Таблица 1

Измеренные расстояния между центрами мир, мм

Номер точки	1	2	3	4	5	6	7
1	0	223,7	225,2	273,0	218,5	217,2	261,7
2	223,7	0	252,4	431,2	441,0	379,7	236,2
3	225,2	252,4	0	221,7	346,6	441,6	434,3
4	273,0	431,2	221,7	0	216,8	427,4	534,5
5	218,5	441,0	346,6	216,8	0	250,1	437,8
6	217,2	379,7	441,6	427,4	250,1	0	246,7
7	261,7	236,2	434,3	534,5	437,8	246,7	0

Таблица 2

Координаты, измеренные с точностью до целых пикселей

Номер точки	1	2	3	4	5	6	7
<i>i</i>	279	239	269	309	318	293	249
<i>j</i>	163	168	202	202	164	127	127

Таблица 3

Координаты, измеренные с точностью до долей пикселей по двум алгоритмам

Алгоритм	Номер точки	1	2	3	4	5	6	7
1	<i>i</i>	279,10	239,50	269,20	308,70	318,10	293,40	249,30
	<i>j</i>	163,20	168,40	202,40	201,90	164,30	127,20	127,30
2	<i>i</i>	279,05	239,41	269,17	308,72	318,07	293,33	249,29
	<i>j</i>	163,31	168,35	202,29	202,02	164,31	127,25	127,28

Производили съёмку тест-объекта со следующими параметрами: расстояние съёмки 64,38 м; фокусное расстояние камеры 50 мм; размер пиксела в плоскости объекта 5,60 мм. Размер пиксела на объекте определяли по расстояниям в пикселах между хорошо различимыми контрастными штрихами, располагавшимися на расстоянии около двух метров в плоскости снимаемого объекта вдоль строк и вдоль столбцов раstra. С помощью программы автоматизированного поиска получили целочисленные пиксельные координаты центров мир и координаты, уточнённые до долей пикселей с применением двух алгоритмов.

В качестве исходных данных для алгоритмов поиска использовали начальные координаты процесса поиска и размер области поиска, в которой находился центр мира. Начальные координаты задавал оператор путём приближённого наведения курсора на изображение мира, при этом размер области поиска определялся точностью наведения на центр мира и в данном эксперименте составлял ± 5 пикселей по каждой координате. Результаты автоматического измерения пиксельных координат центров приведены в табл. 2, 3.

По полученным данным рассчитаны расстояния между всеми парами центров опорных знаков (21 расстояние для каждого метода) и определены СКО расстояний, измеренных по изображениям, от точных значений (измеренных с точностью до долей миллиметра).

При целочисленном определении координат центров опорных знаков СКО составило 1,76 мм, т. е. приблизительно 0,315 пиксела. При использовании алгоритмов 1, 2 СКО составили 0,50 мм (приблизительно 0,089 пиксела) и 0,28 мм (приблизительно 0,050 пиксела) соответственно.

Результаты оценки точности измерения расстояний и определения координат центров изображений мир приведены в табл. 4.

Таким образом, программа поиска центров изображений опорных знаков в режиме субпиксельного автоматического определения координат обеспечила уменьшение СКО определения координат до 0,063 пиксела при применении алгоритма 1 и до 0,035 пиксела при применении алгоритма 2, что приблизительно в 4 и 6 раз соответственно меньше расчётного СКО при целочисленном поиске с точностью до пикселей. Более быстродействующий алгоритм 2 показал более точные (почти в 1,8 раза) результаты по сравнению с алгоритмом 1.

Таблица 4

Результаты оценки точности определения координат

Параметр	σ_L , мм	σ_L , пиксели	σ_x, σ_y , пиксели
Расчётные значения	2,28	0,408	0,289
Целочисленные координаты	1,76	0,315	0,223
Уточнённые координаты (алгоритм 1)	0,50	0,089	0,063
Уточнённые координаты (алгоритм 2)	0,28	0,050	0,035

Заключение. Анализ влияния дискретной структуры растровых изображений на координатно-измерительные свойства цифровых изображений показал, что расчётное СКО определения расстояний на растровом изображении из-за округления для длин более 10 пикселей составило около $\sqrt{1/6}$, т. е. приблизительно 0,408 пиксела, что в $\sqrt{2}$ раз превысило погрешность определения каждой координаты. При этом средняя погрешность практически равна нулю. Программа поиска центров изображений опорных знаков в режиме субпиксельного автоматического определения координат, разработанная на основе предложенного метода, обеспечила уменьшение СКО определения координат. При этом результаты применения алгоритма, основанного на свойстве круговой симметрии корреляционной функции, оказались более точными, чем результаты применения алгоритма прямого поиска точки максимума корреляции. Таким образом, оба алгоритма, реализовавших предложенный авторами метод, подтвердили его эффективность и возможность применения в аппаратно-программных комплексах для автоматизированного определения координат цифровых изображений фотограмметрических опорных знаков.

Список источников

1. Аникеева И. А. Контроль качества материалов космической съёмки, получаемых российскими оптико-электронными системами ДЗЗ картографического назначения // Дистанционное зондирование Земли из космоса в России. 2020. № 1. С. 26–32.
2. Чекалин В. Ф., Сухов А. А. Проблемы калибровки измерительных средств российских спутников дистанционного зондирования Земли // Геодезия и картография. 2019. № 6. С. 39–47. <https://doi.org/10.22389/0016-7126-2019-948-6-39-47>
3. Бабашкин Н. М., Кадничанский С. А., Нехин С. С. Исследовательские испытания программно-аппаратных комплексов Геоскан 101 и Геоскан 201 // Геодезия и картография. 2020. № 1. С. 19–25. <https://doi.org/10.22389/0016-7126-2020-955-1-19-25>
4. Патент № 2457435 РФ / И. Г. Журкин, Г. Г. Сычев, А. Т. Калинин // Изобретения. Полезные модели. 2012. № 21.
5. Журкин И. Г., Сычев Г. Г., Грузинов В. С., Чабан Л. Н. Экспериментальные исследования и перспективы развития системы валидационных подспутниковых наблюдений // Измерительная техника. 2015. № 3. С. 41–45.
6. Миронова Т. В. Ошибки измерений при обработке бинарных и полутоновых изображений. // Автометрия. 2014. № 5. С. 84–91.
7. Осадчий И. С. Метод субпиксельного измерения координат изображений звезд для приборов астроориентации космического базирования // Журнал радиоэлектроники. 2015. № 5. С. 1–25.
8. Щербинина Н. В. Алгоритм определения субпиксельных координат точечного объекта. // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: История. Политология. Экономика. Информатика. 2014. № 1 (172). С. 88–93.

9. Михайлов А. П., Чибуничев А. Г. Фотограмметрия. Учебник для высшей школы / Под ред. д. т. н. проф. А. Г. Чибуничева. М: Изд-во МИИГАиК, 2016. 294 с.

10. Максимов А. И., Сергеев В. В. Метод оптимального линейного сверхразрешающего восстановления изображений // Компьютерная оптика. 2021. Т. 45. № 5. С. 692–701. <https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-909>

11. Козлов В. Л. Оптимизация размера окна сканирования для измерений дальности по цифровым изображениям // Журнал Белорусского государственного университета. Физика. 2018. № 2. С. 133–140.

References

1. Anikeeva I. A., Kontrol' kachestva materialov kosmicheskoy s'yomki, poluchaemyh rossijskimi optiko-elektronnyimi sistemami DZZ kartograficheskogo naznacheniya [Quality control of space survey materials obtained by Russian optoelectronic remote sensing systems for cartographic purposes], *Remote sensing of the Earth from space in Russia*, 2020, no. 1, pp. 26–32. (In Russ.)
2. Chekalin V. F., Sukhov A. A., *Geodesy and cartography*, 2019, vol. 80, no. 6, pp. 39–47. (In Russ.) <https://doi.org/10.22389/0016-7126-2019-948-6-39-47>
3. Babashkin N. M., Kadnichanskiy S. A., Nekhin S. S., *Geodesy and cartography*, 2020, vol. 81, no. 1, pp. 19–25. (In Russ.) <https://doi.org/10.22389/0016-7126-2020-955-1-19-25>
4. Zhurkin I. G., Sychev G. G., Kalinkin A. T., RF Patent no. 2457435, *Byull. Izobret.*, no. 21 (2012).
5. Zhurkin I. G., Sychev G. G., Gruzinov V. S., Chaban L. N., *Measurement Techniques*, 2015, vol. 58, pp. 303–308. <https://doi.org/10.1007/s11018-015-0704-4>
6. Mironova T. V., *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2014, vol. 50, no. 5, pp. 498–504. <https://doi.org/10.3103/S8756699014050082>
7. Osadchiy I. S., Metod subpiksel'nogo izmereniya koordinat izobrazhenij zvezd dlya priborov astroorientacii kosmicheskogo bazirovaniya [Method of subpixel measurement of coordinates of images of stars for space-based astroorientation devices], *Journal of Radio Electronics*, 2015, no. 5, pp. 1–25. (In Russ.)
8. Shcherbinina N. V., Algorithm for of determination subpixel coordinates of point targets, *Scientific bulletin of Belgorod State University. History, Political science, Economics, Information technologies Series*, 2014, no. 1 (172), pp. 88–93. (In Russ.)
9. Mikhailov A. P., Chibunichev A. G., *Fotogrammetriya, Uchebnik dlya vysshej shkoly* [Photogrammetry, Textbook for higher education], Moscow, MIIGAIK Publ., 2016, 294 p. (In Russ.)
10. Maksimov A. I., Sergeyev V. V., *Computer Optics*, 2021, vol. 45, no. 5, pp. 692–701. (In Russ.) <https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-909>
11. Kozlov V. L., Optimizing the scanning window size for the distance measuring from digital images, *Journal of the Belarusian State University, Physics*, 2018, no. 2, pp. 133–140. (In Russ.)

Статья поступила в редакцию 24.05.2021; одобрена после рецензирования 06.07.2021; принята к публикации 13.07.2021.
The article was submitted 24.05.2021; approved after reviewing 06.07.2021; accepted for publication 13.07.2021.