

УДК 528.5

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ЗВЕЗД ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ АСТРОНОМИЧЕСКИХ КООРДИНАТ АВТОМАТИЗИРОВАННЫМ ЗЕНИТНЫМ ТЕЛЕСКОПОМ

С.В. Гайворонский^a, Е.В. Русин^{a, b}, В.В. Цодокова^a

^a ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, 197046, Российская Федерация

^b Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

Адрес для переписки: com.rev@mail.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 01.07.14, принята к печати 22.12.14

doi: 10.17586/2226-1494-2015-15-1-22-29

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Гайворонский С.В., Русин Е.В., Цодокова В.В. Идентификация звезд при определении астрономических координат автоматизированным зенитным телескопом // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Том 15. № 1. С. 22–29

Аннотация.

Предмет исследования. Рассмотрены два подхода к решению задачи идентификации – алгоритмы подобных треугольников и межзвездных угловых расстояний.

Метод. Применительно к задаче определения астрономических координат автоматизированным зенитным телескопом проведен сравнительный анализ этих алгоритмов с использованием экспериментальных данных, полученных с помощью макета зенитного телескопа.

Основные результаты. В результате проведенного анализа определено, что метод идентификации звезд по межзвездным угловым расстояниям позволяет верно распознавать большее количество звезд и в несколько раз быстрее, чем алгоритм подобных треугольников. В связи с зависимостью алгоритма межзвездных угловых расстояний от фокуса объектива предложен комбинированный метод идентификации звезд. Идея метода заключается в совмещении двух упомянутых выше алгоритмов с целью решения следующих задач: расчета фокусного расстояния объектива и непосредственно распознавания звезд.

Практическая значимость. Предложенный метод позволяет при сравнительно малом времени обработки распознавать видимые в поле зрения астроориентиры независимо от наличия информации о фокусном расстоянии объектива.

Ключевые слова: оптико-электронный прибор, астрономические координаты, зенитный телескоп, идентификация звезд

STARS IDENTIFICATION AT THE ASTRONOMICAL COORDINATES DETERMINATION BY MEANS OF AN AUTOMATED ZENITH TELESCOPE

S.V. Gayvoronskiy^a, E.V. Rusin^{a, b}, V.V. Tsodokova^a

^a Concern CSRI “Elektropryor” JSC, Saint Petersburg, 197046, Russian Federation

^b ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

Corresponding author: com.rev@mail.ru

Article info

Received 01.07.14, accepted 22.12.14

doi: 10.17586/2226-1494-2015-15-1-22-29

Article in Russian

Reference for citation: Gayvoronskiy S.V., Rusin E.V., Tsodokova V.V. Stars identification at the astronomical coordinates determination by means of an automated zenith telescope. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2015, vol. 15, no. 1, pp. 22–29 (in Russian)

Abstract.

Scope of research. The paper deals with two approaches to the stars identification: an algorithm of similar triangles and an algorithm of interstellar angular distances.

Method. Comparative analysis of the considered algorithms is performed using experimental data obtained by the prototype of zenith telescope as applied to the problem of coordinates determination by automated zenith telescope.

Main results. The analysis has revealed that identification method based on the interstellar angular distances provides star identification with higher reliability and several times faster than the algorithm of similar triangles. However, the algorithm of interstellar angular distances is sensitive to the lens focal length, so a combined stars identification method is proposed. The idea of this method is to integrate the two above algorithms in order to calculate the lens focal length and to identify directly the stars.

Practical significance. The combined method gives the possibility for valid identification of the stars visible in the field of view with comparatively short processing time whether the lens focal length is available or not.

Keywords: optoelectronic device, astronomical coordinates, zenith telescope, stars identification.

Введение

Автоматизированный зенитный телескоп предназначен для высокоточного определения астрономических координат по результатам наблюдений околозенитного участка звездного неба и представляет собой оптико-электронный прибор (рис. 1), в котором объектив 1, соединенный с телекамерой 2, и датчики горизонта 3 установлены на платформе, имеющей возможность разворота вокруг вертикальной оси. Также предусмотрен механизм автоматического горизонтирования 4. Оптическая ось объектива направлена вертикально.

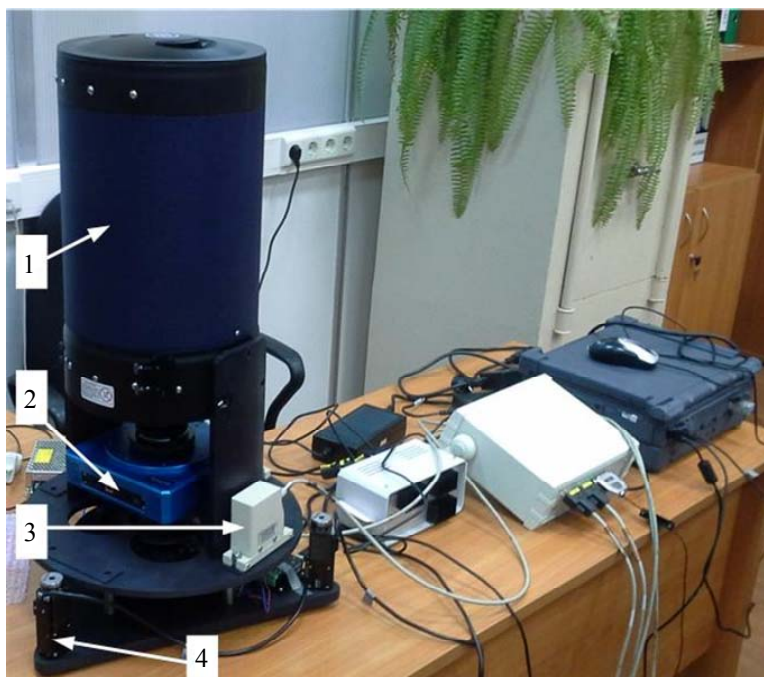


Рис. 1. Макет зенитного телескопа: 1 – объектив; 2 – телекамера; 3 – датчики горизонта; 4 – механизм горизонтирования. Характеристики макета: фокусное расстояние 1900 мм, диаметр входного зрачка 200 мм, размер фотоприемного устройства (ФПУ) 4872×3248 пикселей, размер пикселя 0,0074 мм

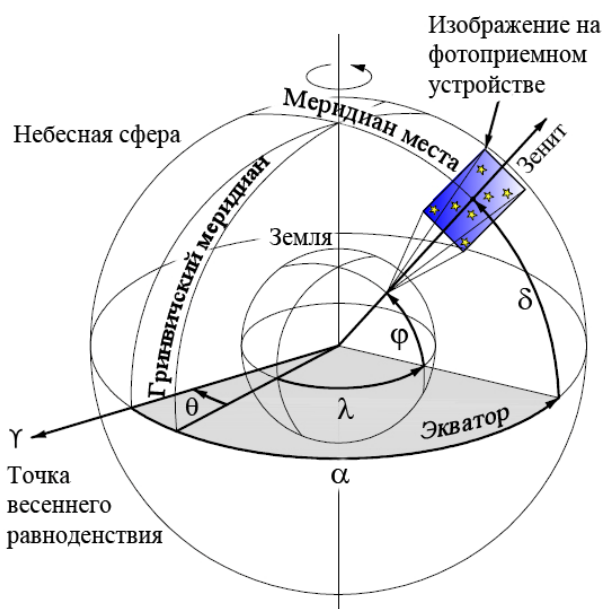


Рис. 2. Эквивалентность астрономических и экваториальных координат

Астрономические координаты определяются посредством измерения направления на небесные объекты (звезды) с известными экваториальными координатами (прямое восхождение α и склонение δ), при этом используют эквивалентность астрономических координат (φ , λ) точки наблюдения и экваториальных координат для звезд, расположенных непосредственно в зените (рис. 2):

$$\varphi = \delta;$$

$$\lambda = \alpha - \theta,$$

где θ – гринвичское звездное время [1–3].

Однако на практике наблюдение звезд непосредственно в точке зенита затруднительно. В связи с этим измерения производятся в следующем порядке:

1. регистрация при помощи телевизионной аппаратуры последовательности кадров, содержащих изображения астроориентиров, находящихся в зоне зенита (в пределах поля зрения);
2. определение в каждом кадре координат энергетических центров изображений всех звезд [4–6];
3. идентификация звезд;
4. интерполяция точки зенита и определение ее экваториальных координат.

Одновременно фиксируется время регистрации кадра (для расчета θ). Блок-схема алгоритма определения астрономических координат представлена на рис. 3.

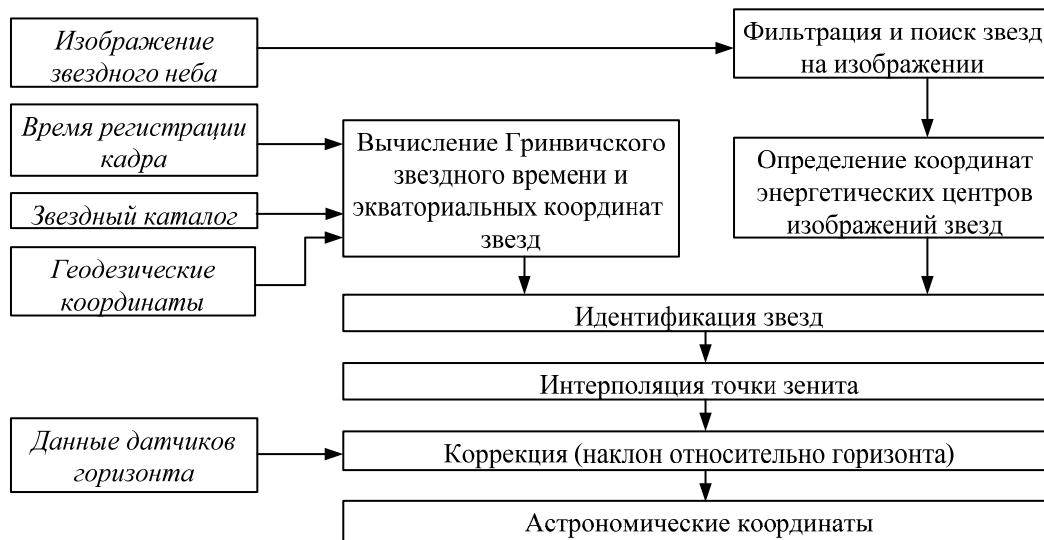


Рис. 3. Блок-схема алгоритма определения астрономических координат

Важным этапом алгоритма определения астрономических координат является идентификация звезд. От количества верно опознанных астроориентиров зависит точность окончательного результата, а от скорости обработки – быстродействие всей системы.

В настоящей работе представлены исследования различных подходов к решению задачи идентификации с целью синтеза алгоритма, позволяющего наиболее оперативно и достоверно распознавать звезды.

Идентификация звезд

Исходными данными для алгоритма идентификации служат измеренные координаты энергетических центров изображений звезд в плоскости ФПУ (x, y) и их экваториальные координаты (α, δ) из каталога [7].

Для решения задачи идентификации необходимо сопоставить объекты, содержащиеся в двух областях – на изображении звездного неба и в рабочем каталоге, который представляет собой часть общего звездного каталога, выделенную по ряду признаков для текущего момента регистрации кадра с целью уменьшения объема вычислений. Следует отметить, что эти две области развернуты друг относительно друга и отмасштабированы произвольным образом. Кроме того, количество объектов в обеих областях не совпадает.

Из всего многообразия алгоритмов идентификации целесообразно использовать наиболее быстродействующие, например, геометрические. Идея геометрических алгоритмов заключается в составлении из звезд, попавших в поле зрения объектива, различных геометрических фигур, в которых в качестве базовых характеристик для распознавания используются межзвездные угловые расстояния, сферические углы, образуемые звездами на небесной сфере, отношения сторон, периметры, площади и прочие характеристики, с последующим сравнением их с таковыми же, но вычисленными для звезд из каталога, заранее записанными в память компьютера [8–11].

Для решения задачи идентификации звезд, зарегистрированных зенитным телескопом, рассматривались следующие геометрические алгоритмы: подобных треугольников и межзвездных угловых расстояний.

Алгоритм сравнения подобных треугольников

Вследствие того, что небесная сфера проецируется на плоскость, необходимо использовать преобразование касательной проекции, т.е. перевести сферические координаты звезд (α , δ) в прямоугольные (идеальные) координаты с использованием следующих выражений [12]:

$$\xi = \frac{\operatorname{ctg} \delta \sin(\alpha - \alpha_0)}{\sin \delta_0 + \operatorname{ctg} \delta \cos \delta_0 \cos(\alpha - \alpha_0)}; \quad (1)$$

$$\eta = \frac{\cos \delta_0 - \operatorname{ctg} \delta \sin \delta_0 \cos(\alpha - \alpha_0)}{\sin \delta_0 + \operatorname{ctg} \delta \cos \delta_0 \cos(\alpha - \alpha_0)},$$

где (α_0, δ_0) – начальные экваториальные координаты:

$$\delta_0 = \varphi_0;$$

$$\alpha_0 = \lambda_0 + \theta,$$

где (φ_0, λ_0) – геодезические координаты точки размещения зенитного телескопа.

По координатам изображений звезд на ФПУ (x, y) и идеальным координатам (ξ, η) строятся всевозможные треугольники. Далее осуществляется процесс перебора, в котором каждый треугольник на изображении сравнивается со всеми треугольниками из рабочего каталога с целью определения подобия. Признаком, с помощью которого возможно определить подобие треугольников, является отношения сторон:

$$p = \frac{b}{c}; \quad q = \frac{a}{c},$$

где a, b, c – стороны треугольника ($c \geq b \geq a$).

Разницы отношения сторон треугольников, составленных из звезд на изображении (p_1, q_1) и из объектов в каталоге (p_2, q_2) , должны удовлетворять следующему условию:

$$\begin{cases} |p_1 - p_2| < \varepsilon; \\ |q_1 - q_2| < \varepsilon, \end{cases} \quad (2)$$

где ε – допустимое расхождение, обусловленное погрешностью вычисления сторон a, b, c в каждой из областей и зависящее от точности определения координат звезд на изображении и экваториальных координат в звездном каталоге.

Из звезд, находящихся в соответствующих вершинах подобных треугольников, формируются пары (из двух треугольников – три пары), которые заносятся в табл. 1. Размер таблицы соответствий – N_1, N_2 , где N_1 – количество звезд в каталоге, N_2 – количество звезд на снимке.

		Звезды на снимке									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Звезды в каталоге	1	3	5	1	0	1	2	2	0	0	0
	2	13	56	1	0	0	0	0	2	1	0
	3	46	13	0	1	1	1	0	0	0	0
	4	2	6	1	5	0	2	4	0	0	0
	5	2	2	61	3	0	0	3	0	0	1
	6	2	4	1	2	0	2	0	0	0	1
	7	1	0	0	1	2	0	3	0	0	0
	8	5	1	1	0	2	1	0	0	0	1
	9	1	2	0	59	0	2	2	0	0	0
	10	1	1	1	0	0	0	2	1	0	0
	11	4	2	2	1	65	0	0	0	0	0
	12	0	3	0	4	0	55	3	2	1	0

Таблица 1. Фрагмент таблицы соответствий

Каждый раз, когда выполняется условие (2), звездной паре прибавляется 1 «голос». Пары звезд, набравшие наибольшее количество «голосов» после завершения процесса перебора, считаются соответствующими друг другу [13].

Алгоритм сравнения межзвездных угловых расстояний

Идея данного алгоритма распознавания звезд основывается на вычислении угловых расстояний между звездами в наблюдаемой группе и сравнении этих расстояний с таковыми же, но вычисленными для звезд из каталога (рис. 4). По измерениям абсцисс x и ординат y энергетических центров изображе-

ний звезд рассчитываются косинусы углов β_{ij} между направлениями на каждую пару отобразившихся звезд по формулам

$$\cos \beta_{ij} = l_i l_j + m_i m_j + n_i n_j,$$

$$l = \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2 + f^2}}, m = \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2 + f^2}}, n = \frac{f}{\sqrt{x^2 + y^2 + f^2}},$$

где f – фокусное расстояние объектива зенитного телескопа; i, j – порядковые номера звезд на изображении. Следует отметить, что при расчете косинусов углов β_{ij} координаты (x, y) приводятся к центру ФПУ (x_0, y_0) (рис. 4).

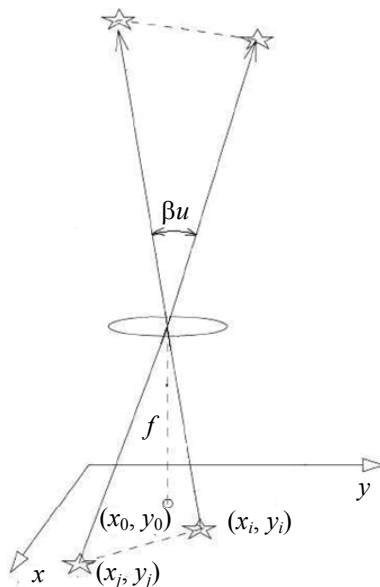


Рис. 4. Межзвездное угловое расстояние

По данным каталога определяются угловые расстояния между парами звезд в виде косинусов этих расстояний, вычисленных по следующим формулам:

$$\cos \beta_{ij} = l_i l_j + m_i m_j + n_i n_j,$$

$$l = \cos \delta \cos \alpha, m = \cos \delta \sin \alpha, n = \sin \delta,$$

где i, j – порядковые номера звезд в каталоге; δ – склонение звезды; α – прямое восхождение звезды.

При работе алгоритма идентификации происходит сравнение измеренных косинусов углов β_{ij} для всех пар отобразившихся звезд с косинусами пар звезд β_{kl} из каталога и выбор звезд, для которых выполняется условие

$$|\cos \beta_{ij} - \cos \beta_{kl}| < \varepsilon, \tag{3}$$

где ε – допустимое расхождение между значениями косинусов, полученных по данным из каталога, и измеренными косинусами, обусловленное ошибками определения углов β_{ij} и β_{kl} [14–16]. Если выполняется условие (3), то звездная пара заносится в таблицу соответствий, аналогичную табл. 1, по результатам заполнения которой определяются звезды, соответствующие друг другу.

Сравнительный анализ алгоритмов идентификации

С целью выбора алгоритма, позволяющего идентифицировать звезды с большей достоверностью и за более короткое время, был проведен сравнительный анализ. Для этого с помощью макета зенитного телескопа (рис. 1) были получены изображения звездного неба и произведена идентификация звезд с использованием рассмотренных алгоритмов. При проведении сравнительного анализа оценивались количество верно идентифицированных звезд и время, затраченное на работу каждого алгоритма. Результаты представлены в табл. 2.

Параметр	Алгоритм подобных треугольников	Алгоритм межзвездных угловых расстояний
Количество верно опознанных звезд, %	99,00	99,15
Время обработки данных, с	4,60	0,54
Априорное знание фокусного расстояния	не требуется	требуется

Таблица 2. Результаты сравнительного анализа алгоритмов идентификации

По представленным в табл. 2 результатам очевидно преимущество идентификации звезд с помощью алгоритма межзвездных угловых расстояний, так как он позволяет верно распознавать большее количество звезд и в несколько раз быстрее, чем алгоритм подобных треугольников. Однако особенностью алгоритма идентификации по межзвездным углам является зависимость от фокусного расстояния объектива, которое может изменяться вследствие влияния различных факторов, например, перепадов температур. Учитывая указанные причины, было принято решение о создании комбинированного метода, позволяющего оперативно распознавать звезды независимо от фокусного расстояния объектива.

Комбинированный метод идентификации звезд

Идея комбинированного метода идентификации звезд заключается в совмещении двух рассмотренных выше алгоритмов с целью решения следующих задач: расчета фокусного расстояния объектива и непосредственно распознавания звезд. На первом шаге регистрируется пробный кадр, с использованием которого производится первичная идентификация методом подобных треугольников с целью расчета фокусного расстояния объектива с использованием следующего выражения:

$$f = \frac{\gamma'}{\operatorname{tg}(m)}, \quad (4)$$

где γ' – размер пикселя ФПУ; m – масштабный коэффициент (угл.с/пиксель). Масштабный коэффициент может быть найден на основе параметров аффинного преобразования прямоугольных координат в идеальные (A_0, A_1, A_2) [17]:

$$\xi = A_0 + A_1x + A_2y.$$

Параметры аффинного преобразования определяются методом наименьших квадратов [18]:

$$A = (H^T H)^{-1} H^T \cdot \xi, \quad (5)$$

где

$$\xi = \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \\ \vdots \\ \xi_i \\ \vdots \\ \xi_n \end{bmatrix}; H = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_i & y_i \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_n & y_n \end{bmatrix}; A = \begin{bmatrix} A_0 \\ A_1 \\ A_2 \end{bmatrix},$$

x_i, y_i – координаты энергетического центра изображения i -ой звезды; i – номер идентифицированной звезды; n – количество идентифицированных звезд. Масштабный коэффициент определяется как

$$m = \sqrt{A_1^2 + A_2^2}. \quad (6)$$

Далее идентификация звезд производится по алгоритму межзвездных угловых расстояний.

По изображению звездного неба, полученного с помощью макета зенитного телескопа, была произведена идентификация звезд с использованием комбинированного метода. В результате обработки пробного кадра было идентифицировано 15 звезд. Координаты энергетических центров их изображений, а также идеальные координаты, рассчитанные в соответствии с (1), представлены в табл. 3.

i	x , пиксель	y , пиксель	α	δ	ξ	η
1	4419,75	1865,50	17° 19' 12,04"	60° 13' 07,79"	0,001009	-0,00774
2	3622,87	668,91	16° 46' 37,33"	60° 23' 38,18"	-0,00368	-0,00467
3	2977,96	481,79	16° 41' 16,02"	60° 32' 14,39"	-0,00443	-0,00216
4	3814,37	664,93	16° 46' 35,32"	60° 21' 04,14"	-0,00369	-0,00542
5	4276,84	2284,48	17° 30' 29,31"	60° 15' 04,28"	0,002637	-0,00717
6	2049,16	572,09	16° 43' 20,24"	60° 44' 41,81"	-0,00411	0,001457
7	2557,68	1723,61	17° 15' 00,41"	60° 38' 03,75"	0,000397	-0,00049
8	2124,38	1226,62	17° 01' 17,99"	60° 43' 48,25"	-0,00155	0,001184
9	1555,59	534,35	16° 42' 05,93"	60° 51' 18,29"	-0,00427	0,003379
10	790,99	1375,71	17° 05' 02,07"	61° 01' 41,02"	-0,00101	0,006384
11	1243,65	828,52	16° 50' 04,55"	60° 55' 32,25"	-0,00313	0,004603
12	818,51	483,50	16° 40' 22,89"	61° 01' 09,87"	-0,00449	0,006249
13	2931,37	2798,28	17° 44' 22,10"	60° 33' 06,45"	0,004596	-0,00191
14	2524,97	2344,74	17° 31' 58,37"	60° 38' 32,59"	0,002816	-0,00034
15	2219,92	2383,27	17° 33' 00,48"	60° 42' 37,85"	0,002957	0,000847

Таблица 3. Данные для расчета фокусного расстояния объектива

С использованием данных, представленных в табл. 3, в соответствии с (5) были определены параметры аффинного преобразования прямоугольных координат в идеальные:

$$A_0 = -0,006398; A_1 = 3,092363 \cdot 10^{-8}; A_2 = 3,896791 \cdot 10^{-6}.$$

С использованием выражения (6) был рассчитан масштабный коэффициент: $m = 0,804''$.

В соответствии с выражением (4) было определено фокусное расстояние объектива: $f = 1898,94$ мм.

Рассчитанное фокусное расстояние незначительно отличается от указанного в документации объектива ($f = 1900$ мм), используемого в макете зенитного телескопа. Таким образом, можно сделать вывод о работоспособности алгоритма расчета фокусного расстояния.

Далее идентификация звезд была произведена методом межзвездных углов с использованием полученного фокусного расстояния. Количество верно опознанных звезд в этом кадре составило 100%, время обработки первого кадра для расчета фокусного расстояния – 4,6 с, время, затраченное на идентификацию последующих снимков – 0,54 с на кадр. Таким образом, комбинированный метод позволяет при сравнительно малом времени обработки идентифицировать видимые в поле зрения астроориентиры независимо от наличия информации о фокусном расстоянии объектива.

Заключение

В работе рассмотрены два подхода к решению задачи идентификации звезд: алгоритм подобных треугольников и межзвездных угловых расстояний.

Применительно к задаче определения астрономических координат автоматизированным зенитным телескопом проведен сравнительный анализ рассмотренных алгоритмов с использованием экспериментальных данных. В результате проведенного анализа определено, что метод идентификации звезд по межзвездным угловым расстояниям позволяет верно распознавать большее количество звезд и в несколько раз быстрее, чем алгоритм подобных треугольников. В связи с зависимостью алгоритма межзвездных угловых расстояний от фокуса объектива предложен комбинированный метод идентификации звезд, идея которого заключается в совмещении двух упомянутых выше алгоритмов с целью решения следующих задач: расчета фокусного расстояния объектива и непосредственно распознавания звезд. Комбинированный метод позволяет при сравнительно малом времени обработки распознавать видимые в поле зрения астроориентиры независимо от наличия информации о фокусном расстоянии объектива.

References

1. Avanesov G.A., Bessonov R.V., Kurkina A.N., Liudomirsky M.B., Kayutin I.S., Yamshchikov N.E. Avtonomnye besplatformennye astroinertsial'nye navigatsionnye sistemy: printsipy postroeniya, rezhimy raboty i opyt ekspluatatsii [Autonomous strapdown stellar-inertial navigation systems: design principles, operation modes and operating experience]. *Girokopiya i Navigatsiya*, 2013, no. 3, pp. 91–110.
2. Abakumov V.M. Features of the measurement of the angular coordinates of stars by precision optoelectronic systems. *Journal of Optical Technology (A Translation of Opticheskii Zhurnal)*, 1996, vol. 63, no. 7, pp. 537–541.
3. Brumberg V.A., Glebova N.I., Lukashova M.V., Malkov A.A., Pit'eva E.V., Rumyantseva L.I., Sveshnikov M.L., Fursenko M.A. Rasshirennoe ob'yasnenie k "Astronomicheskomu ezhegodniku" [Expanded explanation to the "Astronomical Yearbook"]. *Trudy IPA RAN*, 2004, no. 10, pp. 62–67.
4. Berezin V.B., Berezin V.V., Sokolov A.V., Tsytulin A.K. Adaptivnoe schityvanie izobrazheniya v astronomicheskoi sisteme na matrichnom pribore s zaryadovoi svyaz'yu [Adaptive CCD pixel's size for star detection and position estimation]. *Izv. Vuzov Rossii. Radioelektronika*, 2004, no. 4, pp. 36–45.
5. Mantsvetov A.A., Sokolov A.V., Umnikov D.V., Tsytulin A.K. Izmerenie koordinat spetsial'no formiruemykh opticheskikh signalov [Coordinate measuring specially formed optical signals]. *Voprosy Radioelektroniki. Seriya: Tekhnika Televideniya*, 2006, no. 2, pp. 90–94.
6. Gayvoronsky S., Rusin V., Tsodokova V. A comparative analysis of methods for determining star image coordinates in the photodetector plane. *Automation and Control: Proc. Int. Conf. of Young Scientists*. St. Petersburg, 2013, pp. 54–58.
7. Tsvetkov A.S. *Rukovodstvo po Prakticheskoi Rabote s Katalogom Tycho-2* [Guidelines for Practical Operation with Tycho-2 Catalog]. St. Petersburg, 2005, 132 p.
8. Akkardo D., Rufino J. Novoe reshenie zadachi polucheniya nachal'nykh dannykh ob orientatsii pri pomoshchi astronomicheskogo datchika: algoritm, realizatsiya, ispytaniya [A new solution of the problem of primary data obtaining by using astronomical orientation sensor: algorithm, implementation, test]. *Girokopiya i Navigatsiya*, 2001, no. 1, pp. 87–100.
9. Osipik V.A., Fedoseev V.I. Algorithms for automatically recognizing star groups from on board a spacecraft. *Journal of Optical Technology (A Translation of Opticheskii Zhurnal)*, 1998, vol. 65, no. 8, pp. 629–635.

10. Kruzhilov I.S. *Metody i Programmnye Sredstva Povysheniya Effektivnosti Raspoznavaniya Grupp Zvezd v Avtonomnoi Astronavigatsii*. Diss. ... kand. tekhn. nauk [Methods and Software Improve the Efficiency of Recognition of Groups of Stars in Autonomous Celestial Navigation. Diss. eng. sci.]. Moscow, 2010, 141 p.
11. Ezhov O.M. Comparative analysis of star-detection algorithms for orientation devices with CCD arrays. *Journal of Optical Technology (A Translation of Opticheskii Zhurnal)*, 1998, vol. 65, no. 8, pp. 649–652.
12. Blazhko S.N. *Kurs Prakticheskoi Astronomii* [Course of Practical Astronomy]. Moscow, Nauka Publ., 1979, 432 p.
13. Bratt S.P. *Analysis of Star Identification Algorithms due to Uncompensated Spatial Distortion*. Master of Science Thesis. Available at: <http://digitalcommons.usu.edu/etd/1714> (accessed 10.11.2013).
14. Malinin V.V. *Modelirovanie i Optimizatsiya Optiko-Elektronnykh Priborov s Fotopriemnymi Matritsami* [Simulation and Optimization of Optoelectronic Devices with the Photodetector Array]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2005, 256 p.
15. Malinin V.V., Faleev A.V. Optoelectronic systems for orientation from a star field. *Journal of Optical Technology (A Translation of Opticheskii Zhurnal)*, 1996, vol. 63, no. 10, pp. 745–748.
16. Osipik V.A., Fedoseev V.I. Mathematical modelling of algorithms for recognizing groups of stars. *Journal of Optical Technology (A Translation of Opticheskii Zhurnal)*, 1996, vol. 63, no. 7, pp. 505–509.
17. Kiselev A.A. *Teoreticheskie Osnovaniya Fotograficheskoi Astrometrii* [Theoretical Foundations of Photographic Astrometry]. Moscow, Nauka Publ., 1989, 264 p.
18. Stepanov O.A. *Osnovy Teorii Otsenivaniya s Prilozheniyami k Zadacham Obrabotki Navigatsionnoi Informatsii. Ch. 1. Vvedenie v Teoriyu Otsenivaniya* [Fundamentals of Estimation Theory with Applications to Problems of Navigational Information Processing. Part 1. Introduction to the Evaluation Theory]. St. Petersburg, TsNII Elektropribor Publ., 2009, 440 p.

- Гайворонский Станислав Викторович** – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, 197046, Российская Федерация, gaivoronsky@mail.ru
- Русин Евгений Вадимович** – студент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация; инженер, ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, 197046, Российская Федерация, com.rev@mail.ru
- Цодокова Вероника Владимировна** – инженер, ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, 197046, Российская Федерация, tsodokova.vv@gmail.com
- Stanislav V. Gayvoronskiy** – PhD, senior scientific researcher, Concern CSRI “Elektropribor” JSC, Saint Petersburg, 197046, Russian Federation, gaivoronsky@mail.ru
- Evgeniy V. Rusin** – student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation; engineer, Concern CSRI “Elektropribor” JSC, Saint Petersburg, 197046, Russian Federation, com.rev@mail.ru
- Veronika V. Tsodokova** – engineer, Concern CSRI “Elektropribor” JSC, Saint Petersburg, 197046, Russian Federation, tsodokova.vv@gmail.com