

УДК 004.932

doi:10.20998/2413-4295.2016.18.19

МЕТОД АВАРИЙНОГО ОТОЖДЕСТВЛЕНИЯ ЦИФРОВЫХ КАДРОВ С СУЩЕСТВЕННОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬЮ ИХ ПАРАМЕТРОВ**Н. Ю. ДИХТЯР^{1*}, Я. С. МОВСЕСЯН¹, В. Е. САВАНЕВИЧ², С. В. ХЛАМОВ¹**¹ Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, УКРАИНА² Ужгородский национальный университет, Ужгород, УКРАИНА

*email: movsesian.iana@gmail.com

АННОТАЦИЯ В статье разработан вычислительный метод аварийного отождествления цифровых кадров с существенной неопределенностью их параметров. Разработанный вычислительный метод предназначен для определения начального приближения параметров отождествления формуляров звездного каталога и измерений кадра с существенной неопределенностью их параметров, которая связана с большими ошибками в задании масштаба изображения (фокусного расстояния используемого телескопа) и координат наведения телескопа. Разработанный вычислительный метод апробирован в программном обеспечении автоматического поиска астероидов и комет на серии ПЗС-кадров CoLiTec. Результаты ПО CoLiTec подтверждают достоверность и надежность работы предложенного в статье вычислительного метода.

Ключевые слова: цифровой кадр, аварийное отождествление, постоянные пластинки, первичное отождествление, измерение кадра, формуляр каталога.

THE METHOD OF EMERGENCY IDENTIFICATION OF THE DIGITAL FRAME WITH SUBSTANTIAL UNCERTAINTY OF THEIR PARAMETERS**M. DIKHTYAR^{1*}, IA. MOVSESIAN¹, V. SAVANEVYCH², S. KHLAMOV¹**¹ Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, UKRAINE² Uzhhorod National University, Uzhhorod, UKRAINE

ABSTRACT The article developed a computational method of emergency identification of the digital frames with significant uncertainty of their parameters. Computational method of emergency identification of the digital frames with significant uncertainty of their parameters it is designed to determine for initial approximation of parameters identification forms of the star catalog and measurements of the frame with significant uncertainty of parameters is associated with large errors in setting the image zoom (focal length of the telescope is used), and the coordinates of the telescope pointing. Many years of practical experience in the identification of digital frames with significant uncertainty of their parameters with the use of this method proves its reliability and efficiency. The article by the method of statistical modeling to determine maximum permissible deviation values corresponding angles of triangles (from the side of the frame and stars of the catalog) of the primary identification. Analysis of these data shows the validity of the calculation method chosen constants. Developed a computational method of emergency identification of the digital frames with significant uncertainty of their parameters was implemented in the software automatically search for asteroids and comets on a series of the CCD frames CoLiTec. Software CoLiTec results confirm the accuracy and reliability of the computational method of emergency identification of the digital frames with significant uncertainty of their parameters proposed in the article.

Keywords: digital frame, emergency identification, constant plates, primary identification, measurement of the frame, stars of the catalog.

Введение

Разработка вычислительных методов автоматической обработки серий астрономических изображений является одной из быстро развивающихся предметных областей компьютерной обработки данных [1, 2]. К основным операциям автоматической обработки данных относятся, в том числе, операции отождествления кадров [3, 4, 5, 6]. Отождествление со звездным каталогом кадров, данные о которых содержат существенную неопределенность, является достаточно сложной задачей.

Цель работы

Целью статьи является разработка метода аварийного отождествления, предназначенного для определения начального приближения параметров отождествления формуляров звездного каталога и измерений кадров, данные о которых содержат существенную неопределенность, связанную с большими ошибками в задании масштаба изображения (фокусного расстояния телескопа) и координат наведения телескопа.

Постановка задачі

По некоторой программе телескоп наводится на заданные участки небесной сферы. По результатам наблюдения формируются кадры. По результатам внутрикадровой обработки формируются измерения положения небесных объектов в системе координат сформированных кадров [7, 8]. Для формирования измерений, которые могут быть использованы астрономами, необходимо отождествить измерения кадра с формулярами используемых звездных каталогов.

В большинстве случаев достаточно точно известно положение участка небесной сферы, соответствующее исследуемому кадру. В данных условиях задача отождествления кадров не является сложной. Трудности возникают при существенных ошибках в масштабе (фокусном расстоянии телескопа) и координатах наведения телескопа на заданную точку небесной сферы.

Необходимо найти начальное приближение параметров попарного соответствия (паросочетания) между множествами формуляров используемого каталога и измерений кадра, данные о которых содержат указанную выше существенную неопределенность.

Анализ литературы

В работе [3] проведен подробный анализ существующих методов отождествления цифровых изображений. Это, прежде всего, стробовые методы и методы, основанные на переборе гипотез о сочетании измерений кадра и формуляров каталога с учетом их пропуска и наличия ложных.

Кроме того, в работе [3] разработан оригинальный вычислительный метод отождествления измерений кадра с формулярами каталога. Данный метод отождествления позволяет найти попарное соответствие между совокупностью сформированных на кад্রে измерений и множеством объектов звездного каталога, принадлежащих той же области небесной сферы, что и сформированный кадр.

Используемая в методе отождествления [3] целевая функция является полимодальной. А данный метод, основанный на решении задачи о назначениях венгерским методом, находит экстремум целевой функции, ближайший к используемому начальному приближению. Чтобы отождествление обладало средними минимальными ошибками отождествления необходимо, чтобы используемое начальное приближение было в окрестности глобального максимума используемой целевой функции.

Одним из значимых для практики случаев отождествления является случай взаимного отождествления кадров серии, сформированных примерно в одно и то же время на одном телескопе одной ПЗС – камерой без изменения угла ее поворота.

Положение небесных объектов на кадрах, сформированных таким образом, отличается только параметрами сдвига (параметры поворота околонулевые, а масштаб является неизменным от кадра к кадру). Параметры сдвига общие для всех измерений двух кадров и характеризуют взаимное расположение кадров относительно друг друга на небесной сфере, являясь искомыми параметрами паросочетания между двумя множествами измерений. Для данных условий в работе [9] разработан метод предварительного отождествления, позволяющий определить начальные приближения параметров отождествления измерений кадров и формуляров звездного каталога.

При необходимости отождествления со звездным каталогом кадра, данные о котором содержат существенную неопределенность, метод [9] предварительного отождествления измерений кадров одной серии использовать не представляется возможным.

Изложение основного материала

Конечный статистический метод получения линейных постоянных пластинки. Для предварительного отождествления кадра со звездным каталогом достаточно получить 6 параметров линейных постоянных пластинки [10, 11, 12]. В свою очередь для решения этой задачи достаточно иметь три точки (звезды) на кад্রে и соответствующие им пары в звездном каталоге. Координаты трех точек (звезд) так же составляют 6 параметров. В этой связи, расчет постоянных пластинки по трем точкам является конечным статистическим методом. Он не использует избыточные данные. С помощью конечного статистического метода нельзя исключить или уменьшить ошибки, содержащиеся в оценках положений звезд каталога и кадра. Однако, конечный метод позволяет получить начальное приближение при минимальных вычислительных затратах.

Исходными данными для получения линейных постоянных пластинки конечным статистическим методом являются, с одной стороны, положения трех звезд на отождествляемом кад্রে в системе координат (СК) этого ПЗС-кадра (Рис. 1). С другой стороны, идеальные координаты соответствующих звезд каталога. Для получения идеальных координат звезд каталога из их экваториальных координат достаточно иметь в своем распоряжении некое приближение экваториальных координат оптического центра кадра.

На Рис. 1 точки, соответствующие трем используемым звездам, и их координаты обозначены как $A(x_1, y_1)$, $B(x_2, y_2)$, $C(x_3, y_3)$. Каталогным экваториальным координатам этих звезд соответствуют идеальные координаты $A(\xi_1, \eta_1)$, $B(\xi_2, \eta_2)$, $C(\xi_3, \eta_3)$ соответственно.

Идеальные координаты объекта с его координатами в СК ПЗС-кадра связываются

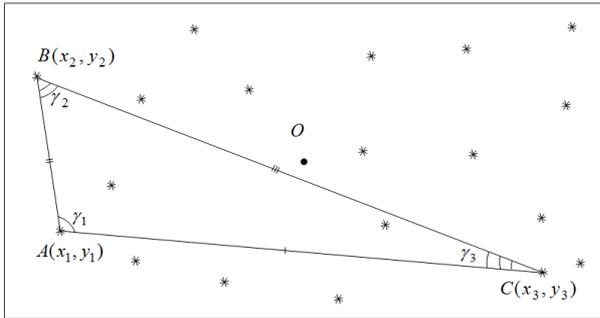


Рис. 1 – Формирование троек первичного отождествления

уравнением редукции [10, 11]:

$$\begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \\ \xi_3 \end{bmatrix}; \tag{1}$$

$$\begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \eta_1 \\ \eta_2 \\ \eta_3 \end{bmatrix}. \tag{2}$$

Возможно и обратное уравнение редукции, которое связывает координаты объекта в СК ПЗС-кадра x, y с его идеальными координатами ξ, η [10, 11]:

$$\begin{bmatrix} a'_0 \\ a'_1 \\ a'_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \xi_1 & \eta_1 \\ 1 & \xi_2 & \eta_2 \\ 1 & \xi_3 & \eta_3 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}; \tag{3}$$

$$\begin{bmatrix} b'_0 \\ b'_1 \\ b'_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \xi_1 & \eta_1 \\ 1 & \xi_2 & \eta_2 \\ 1 & \xi_3 & \eta_3 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{bmatrix}. \tag{4}$$

Сущность метода аварийного отождествления цифровых кадров с существенной неопределенностью их параметров. Для получения линейных постоянных пластинки необходимо наличие трех звезд на кадре (трех измерений) и соответствующие им пары – звезды в каталоге (формуляры каталога). Данное паросочетание может быть названо тройкой первичного отождествления. Очевидно, что данная тройка не единственна, но ни одна из них изначально неизвестна. Каждой тройке соответствует гипотеза «первичного отождествления» о соответствии троек кадра и каталога. В рамках предлагаемого метода искомая тройка (верная гипотеза о соответствии троек кадра и каталога) может быть найдена перебором. Количество вариантов перебора огромно. При верно отобранных представителях каталога и кадра, и их одинаковом количестве равном N количество вариантов выбора

трех представителей кадра будет равно количеству вариантов выбора трех представителей каталога и будет равно количеству сочетаний C_N^3 . В свою очередь количество вариантов выбора троек (по три представителя кадра и каталога) будет равно $(C_N^3)^2$.

При этом, только C_N^3 вариантов будут верными. При отборе $N=100$ измерений кадра и звезд каталога количество троек, которые надо будет проверить, будет примерно равно $10^{11} \div 10^{12}$, в свою очередь при $N=1000$ данное число увеличится примерно до $10^{17} \div 10^{18}$. Такое количество вариантов отбора измерений кадра и звезд каталога может быть перебрано при современном уровне развития вычислительной техники. Однако такая возможность не означает целесообразности реализации указанной операции.

Исходные предпосылки для метода перебора троек для получения линейных постоянных пластинки. Количество вариантов отбора измерений кадра и звезд каталога может быть сокращено при использовании двух следующих предпосылок, вытекающих из изучения закономерностей формирования измерений кадров и формуляров каталогов.

1. Количество пропусков измерений положений звезд на кадре ограничено. При этом, вероятность пропуска измерения зависит от оценки блеска объекта на кадре. Чем выше оценка блеска, тем данная вероятность меньше. Исходя из этой предпосылки для перебора претендентов в члены тройки отбираются самые яркие звезды кадра (измерения с наибольшей оценкой яркости) и каталожные звезды (формуляры каталога с наибольшей оценкой блеска) исследуемого участка звездного неба.

2. Количество ложных измерений и ложных формуляров каталога ограничено, однако не равно 0. Под истинными объектами при отождествлении понимаются звезды – объекты, являющиеся с точки зрения наблюдателя, неподвижными на серии кадров. При этом, ложными считаются измерения, связанные с такими объектами с ненулевым видимым движением, как ИСЗ, астероиды и т.д., а также измерения, связанные с ложными пикселями, другими артефактами изображения. Также к ложным измерениям следует относить измерения с аномально большими отклонениями. Кроме того, с использованием таких измерений достоверную гипотезу о параметрах отождествления все равно построить невозможно.

Формирование множества измерений кадра как троек первичного отождествления со стороны кадра. Для использования в качестве точек (элементов) троек первичного отождествления, используется множество Ω_{bl50} претендентов из N_{bl50} измерений кадра с наибольшей яркостью. Дополнительно вводится множество Ω_{bl100}

измерений кадра с наибольшей яркостью, которые используются для подтверждения гипотез первичного отождествления (формирования веса очередной гипотезы о соответствии троек кадра и каталога). Количество элементов данного множества N_{bl100} в k_{blob} раз больше количества элементов множества Ω_{bl50} :

$$N_{bl100} = k_{blob} \cdot N_{bl50}. \quad (5)$$

Для обеспечения устойчивости отождествления к различным стрессовым факторам необходимо равномерное распределение отождествляемых измерений на кадре. К указанным стрессовым факторам в первую очередь следует отнести наличие на кадрах ярких треков искусственных спутников Земли, эффект перетекания заряда или какие-либо другие особенности, которые могут возникнуть при формировании изображения цифрового кадра. Исходя из этого при отборе претендентов множества Ω_{bl100} измерений кадра, используемых для подтверждения гипотез первичного отождествления, для минимизации ошибок отождествления целесообразно измерения распределить равномерно на кадре.

Для обеспечения равномерного распределения используемых измерений на кадре производится фрагментация кадра. Кадр делится на $M_{reg} \times M_{reg} = M_{reg}^2$ областей. Заданное количество N_{bl50}, N_{bl100} измерений кадра делится на количество фрагментов кадра, и в каждом таком фрагменте отбираются свои $N_{bl50}/M_{reg}^2, N_{bl100}/M_{reg}^2$ самых ярких измерений кадра.

Для этого измерения, принадлежащие каждому фрагменту кадра, сортируются по интегральной яркости (используется строб 5x5 пикселей с центром в пикселе, соответствующем положению объекта, согласно оценке его положения) [6]. Самые яркие N_{bl50}/M_{reg}^2 и N_{bl100}/M_{reg}^2 измерения включаются в множества Ω_{bl50} и Ω_{bl100} соответственно. Использование интегральной яркости в фиксированном стробе позволяет избежать включения ложных измерений в множества Ω_{bl50} и Ω_{bl100} или минимизировать вероятность такого включения.

Если, N_{bl50} или N_{bl100} не делятся без остатка на M_{reg}^2 то в каждом фрагменте кадра остается количество звезд, соответствующее целой части соответствующей дроби.

Формирование множества формуляров каталога как троек первичного отождествления со стороны каталога. Формирование множества звезд астрометрического каталога производится согласно тем же принципам, что и формирование множества измерений кадра. Создается два множества звезд астрометрического каталога. Первое множество

$\Omega_{star100}$ – множество, звезды которого принимают участие в переборе троек первичного отождествления со стороны каталога. Размер множества задается следующим образом:

$$|\Omega_{star100}| = k_{star} \cdot N_{bl50}. \quad (6)$$

Второе множество $\Omega_{star200}$ используются для подтверждения гипотез первичного отождествления (формирования веса очередной гипотезы о соответствии тройки кадра тройке астрометрического каталога). Количество элементов данного множества N_{st200} в k_{star} раз больше количества элементов множества $\Omega_{star100}$:

$$N_{st200} = k_{star} \cdot N_{st100}. \quad (7)$$

Как и при формировании множества измерений кадра исследуемая часть звездного неба (соответствующая отождествляемому кадру) фрагментируется на $M_{reg} \times M_{reg}$ областей. Отобранные звезды каждого фрагмента сортируются по значению блеска. При этом в множества $\Omega_{star100}$ и $\Omega_{star200}$ включаются первые самые яркие $N_{star100}/M_{reg}^2$ и $N_{star200}/M_{reg}^2$ звезд исследуемых фрагментов звездного неба.

Перебор измерений множества Ω_{bl50} как элементов троек первичного отождествления со стороны кадра. Выбор первого измерения любой тройки производится без условий. В качестве такового поочередно используются все элементы множества измерений Ω_{bl50} . Для того, чтобы тройка измерений с координатами $(x_{1(k)}; y_{1(k)}), (x_{2(k)}; y_{2(k)}), (x_{3(k)}; y_{3(k)})$ в СК ПЗС-кадра образовывала треугольник, покрывающий значительную часть кадра, для двух других элементов тройки вводятся условия, полученные в процессе использования данного метода экспериментальным путем. Вторая точка тройки должна находиться не ближе чем k_n углового размера R_{CCD} кадра от первой:

$$r_{(1)(2)} = \sqrt{(y_{2(k)} - y_{1(k)})^2 + (x_{1(k)} - x_{2(k)})^2} \geq 0.5 k_n (R_{CCDx} + R_{CCDy}) \quad (8)$$

Условием для выбора третьей точки тройки является выбор такого измерения на кадре, которому соответствует точка, из которой может быть опущен перпендикуляр r_{trian} на прямую, проходящую через первую и вторую точки тройки первичного отождествления.

Выражение для нахождения длины перпендикуляра r_{trian} выводится на основе определения модуля векторного произведения двух векторов [13]. С помощью свойства векторного

произведения двух векторов можно определить перпендикулярен ли вектор, проведённый через третью точку тройки, этим векторам. А модуль векторного произведения двух соответствующих векторов будет равен длине перпендикуляра r_{trian} :

$$r_{trian} = |x_{1(k)}y_{2(k)} - x_{2(k)}y_{1(k)}|. \quad (9)$$

Длина перпендикуляра r_{trian} может быть найдена с помощью уравнения прямой, проходящей через первую и вторую точки тройки, и уравнения перпендикуляра к этой прямой из третьей точки тройки [13].

Уравнение прямой, проходящей через первую и вторую точки тройки первичного отождествления, имеет вид [13]:

$$\frac{x - x_{1(k)}}{x_{2(k)} - x_{1(k)}} = \frac{y - y_{1(k)}}{y_{2(k)} - y_{1(k)}}. \quad (10)$$

После подстановки координат третьей точки тройки $(x_{3(k)}; y_{3(k)})$ в выражение (10) и некоторых преобразований уравнение прямой, проходящей через первую и вторую точки тройки первичного отождествления, имеет вид:

$$Ax_{3(k)} + By_{3(k)} + C = 0, \quad (11)$$

Где

$$\begin{aligned} A &= (y_{2(k)} - y_{1(k)}); \\ B &= (x_{1(k)} - x_{2(k)}); \\ C &= y_{1(k)} \cdot x_{2(k)} - x_{1(k)} \cdot y_{2(k)}. \end{aligned}$$

Известна формула для нахождения расстояния d от точки до прямой на плоскости, что соответствует длине перпендикуляра, опущенного из данной точки на прямую [13]:

$$d = \frac{|Ax + By + C|}{\sqrt{A^2 + B^2}}. \quad (12)$$

После подстановки уравнения прямой (11) и коэффициентов A и B в выражение (12) длина перпендикуляра r_{trian} как расстояния от третьей точки тройки первичного отождествления до прямой, проходящей через первую и вторую точки данной тройки, будет иметь вид [13]:

$$r_{trian} = \frac{|(y_{2(k)} - y_{1(k)}) \cdot x_{3(k)} + (x_{1(k)} - x_{2(k)}) \cdot y_{3(k)} + y_{1(k)} \cdot x_{2(k)} - x_{1(k)} \cdot y_{2(k)}|}{\sqrt{(y_{2(k)} - y_{1(k)})^2 + (x_{1(k)} - x_{2(k)})^2}}. \quad (13)$$

Третья точка тройки выбирается так, чтобы длина перпендикуляра r_{trian} из выражения (13) была не меньше наперед заданной константы:

$$r_{trian} \geq h_{trian}. \quad (14)$$

При этом константа h_{trian} рассчитывается как $k_{\Delta 12}$ расстояния между 1-й и 2-й точками «тройки»:

$$h_{trian} = k_{\Delta 12} \sqrt{(x_{2(k)} - x_{1(k)})^2 + (y_{2(k)} - y_{1(k)})^2} \quad (15)$$

Предположение об ограниченности количества ложных измерений (или измерений с аномально большими отклонениями) реализуется следующим образом: $(i+1)$ -е ($i=1,2$) измерение тройки не используется более трех раз при одном и том же i -ом измерении. Например, k -е измерение будет использовано в переборе как третье измерение тройки три раза при использовании j -го измерения в качестве второго измерения тройки. А j -е измерение будет использовано в переборе (как второе измерение тройки) три раза относительно i -го, используемого в переборе как первое измерение тройки. Это сделано исходя из предположения, что если отождествление не осуществляется при данной тройке, то значит одно, два или даже три рассматриваемые измерения не соответствуют звезде. Реализация такого подхода повышает и надежность вычислительного метода и снижает вычислительные затраты на реализацию надежного вычислительного метода.

Указанным выше образом формируется тройка измерений кадра. В качестве ее параметров, используемых при отождествлении, используются три угла соответствующего треугольника. Данные углы могут быть вычислены следующим образом.

Для определения угла γ_1 с вершиной в точке $A(x_1, y_1)$ между прямыми AB и AC составляются два вектора. Это вектор \vec{b} из точки $A(x_1, y_1)$ в точку $C(x_3, y_3)$ и вектор \vec{c} из точки $A(x_1, y_1)$ в точку $B(x_2, y_2)$.

Синус угла γ_1 может быть определён на основе выражения для модуля векторного произведения $|\vec{b} \times \vec{c}|$ [13]:

$$|\vec{b} \times \vec{c}| = |\vec{b}| |\vec{c}| \cdot \sin \gamma_1. \quad (16)$$

Где $|\vec{b}| = \sqrt{x_{2(k)}^2 + y_{2(k)}^2}$ – длина вектора \vec{b} ;

$|\vec{c}| = \sqrt{x_{3(k)}^2 + y_{3(k)}^2}$ – длина вектора \vec{c} .

При чем, значение модуля векторного произведения векторов $|\vec{b} \times \vec{c}|$ определяется соотношением [13]:

$$|\vec{b} \times \vec{c}| = |x_{2(k)}y_{3(k)} - y_{2(k)}x_{3(k)}| \quad (17)$$

Косинус угла γ_1 может быть определен из скалярного произведения указанных векторов $\vec{b}\vec{c}$, значение которого определяется соотношением [13]:

$$\vec{b}\vec{c} = |\vec{b}| |\vec{c}| \cos \gamma_1, \quad (18)$$

$$\text{где } \vec{b}\vec{c} = x_{2(k)}x_{3(k)} + y_{2(k)}y_{3(k)}.$$

Таким образом, согласно выражениям (16) ÷ (18) синус и косинус угла γ_1 может быть найден следующим образом:

$$\sin \gamma_1 = \left(\frac{x_{2(k)}y_{3(k)} - y_{2(k)}x_{3(k)}}{\sqrt{x_{2(k)}^2 + y_{2(k)}^2} \cdot \sqrt{x_{3(k)}^2 + y_{3(k)}^2}} \right). \quad (19)$$

$$\cos \gamma_1 = \left(\frac{x_{2(k)}x_{3(k)} + y_{2(k)}y_{3(k)}}{\sqrt{x_{2(k)}^2 + y_{2(k)}^2} \cdot \sqrt{x_{3(k)}^2 + y_{3(k)}^2}} \right); \quad (20)$$

При известных синусе и косинусе угла однозначное его нахождение тривиально.

Аналогично выражениям (19) и (20) могут быть найдены и значения синусов и косинусов углов γ_2 и γ_3 с помощью следующих выражений соответственно:

$$\sin \gamma_2 = \left(\frac{x_{1(k)}y_{3(k)} - y_{1(k)}x_{3(k)}}{\sqrt{x_{1(k)}^2 + y_{1(k)}^2} \cdot \sqrt{x_{3(k)}^2 + y_{3(k)}^2}} \right); \quad (21)$$

$$\cos \gamma_2 = \left(\frac{x_{1(k)}x_{3(k)} + y_{1(k)}y_{3(k)}}{\sqrt{x_{1(k)}^2 + y_{1(k)}^2} \cdot \sqrt{x_{3(k)}^2 + y_{3(k)}^2}} \right); \quad (22)$$

$$\sin \gamma_3 = \left(\frac{x_{1(k)}y_{2(k)} - y_{1(k)}x_{2(k)}}{\sqrt{x_{1(k)}^2 + y_{1(k)}^2} \cdot \sqrt{x_{2(k)}^2 + y_{2(k)}^2}} \right); \quad (23)$$

$$\cos \gamma_3 = \left(\frac{x_{1(k)}x_{2(k)} + y_{1(k)}y_{2(k)}}{\sqrt{x_{1(k)}^2 + y_{1(k)}^2} \cdot \sqrt{x_{2(k)}^2 + y_{2(k)}^2}} \right). \quad (24)$$

Перебор формуляров каталога множества $\Omega_{star100}$ как элементов троек первичного отождествления со стороны каталога. Для каждой сформированной тройки первичного отождествления со стороны кадра организовывается перебор троек первичного отождествления со стороны каталога. В качестве формуляров (точек) троек используются элементы ранее введенного множества $\Omega_{star100}$ формуляров каталога как троек первичного отождествления со стороны каталога. Никаких требований к звездам, входящим в тройки, не предъявляется кроме того, что в тройку должно войти три разные звезды из множества $\Omega_{star100}$.

Как и тройка измерений кадра, тройка звезд

каталога характеризуется значениями углов соответствующих вершин треугольника. Координаты положения звезд каталога представлены в сферической системе координат, а именно во второй экваториальной системе координат [10, 11].

Согласно [11] СК ПЗС-кадра параллельна плоскости идеальной астрофотографии. Поэтому можно использовать плоскость идеальной астрофотографии для расчета углов вершин тройки первичного отождествления со стороны каталога. Для этого определяются тангенциальные координаты звезд используемого каталога в плоскости идеальной астрофотографии с заданными экваториальными координатами (α_0, δ_0) оптического центра [11], согласно выражениям:

$$\xi_{j(k)} = \frac{\cos \delta_{j(k)} \cdot \sin(\alpha_{j(k)} - \alpha_0)}{\cos \delta_0 \cdot \cos \delta_{j(k)} \cdot \cos(\alpha_{j(k)} - \alpha_0) + \sin \delta_0 \cdot \sin \delta_{j(k)}}; \quad (25)$$

$$\eta_{j(k)} = \frac{\cos \delta_0 \cdot \cos(\alpha_{j(k)} - \alpha_0)}{\cos \delta_0 \cdot \cos \delta_{j(k)} \cdot \cos(\alpha_{j(k)} - \alpha_0) + \sin \delta_0 \cdot \sin \delta_{j(k)}}. \quad (26)$$

где $\alpha_{j(k)}, \delta_{j(k)}$ – угловые координаты $j(k)$ -го объекта, содержащиеся в используемом звездном каталоге.

На основе полученных тангенциальных (идеальных) координат по аналогии с выражениями (19) ÷ (24) определяются углы очередного треугольника, соответствующего тройке первичного отождествления со стороны каталога.

Сопоставление троек первичного отождествления со стороны кадра и со стороны каталога. Прежде всего, две исследуемые тройки первичного отождествления проверяются на идентичность углов (каждый с каждым) соответствующих им треугольников. Звезды двух (кадра и каталога) троек считаются предварительно тождественными, если отклонения в значениях соответствующих углов в этих треугольниках не превышают наперед заданной константы $\Delta\gamma$:

$$|\gamma_{1fr} - \gamma_{1cat}| < \Delta\gamma; \quad (27)$$

$$|\gamma_{2fr} - \gamma_{2cat}| < \Delta\gamma; \quad (28)$$

$$|\gamma_{3fr} - \gamma_{3cat}| < \Delta\gamma. \quad (29)$$

где $\gamma_{i fr}, \gamma_{i cat}$ – углы треугольников, соответствующих тройке первичного отождествления со стороны кадра и каталога соответственно;

$\Delta\gamma$ – предельно допустимое значение отклонения значений соответствующих углов треугольников (со стороны кадра и каталога) первичного отождествления.

Константа $\Delta\gamma$ определяет вычислительные затраты метода аварийного отождествления цифровых кадров с существенной неопределенностью

их параметров. Чем больше ее значение, тем большее количество троек измерений могут рассматриваться в качестве треугольников первичного отождествления, тем для большего количества наборов значений вычисляются линейные постоянные пластинок и проводятся все остальные операции проверки истинности очередной гипотезы о параметрах отождествления кадра и каталога, соответствующей рассматриваемым тройкам первичного отождествления. Детальные исследования проводились в интересах обсерватории ISON-NM [14]. Обсерватория находится на горе Джой (Мейхилл), Нью-Мексико, США и использует 40-см телескоп САНТЕЛ-400АН и ПЗС-матрицу FLI ML09000-65 (3056×3056 пикселей, размер пикселя 12 мкм). Всего было использовано 19 серий по 4 кадра каждая. Время экспозиции составляло 150 с. Кадры были получены в период с 04.03.2014 по 30.03.14. Для рассмотренной в работе обсерватории ISON-NM разница во времени счета программы, реализующей предложенный в статье метод, при $\Delta\gamma = 1^0$ и $\Delta\gamma = 7^0$ составляет в зависимости от рассматриваемого кадра от 10 до 100 раз.

На основании пар троек, признанных предварительно тождественными, производится расчет линейных постоянных пластинки согласно выражений (1), (2) [10, 11]. В дальнейшем, по линейным постоянным пластинки определяются координаты звезд из множества $\Omega_{star\ 200}$ формуляров каталога в СК ПЗС-кадра.

Следующим шагом с использованием венгерского метода отождествляются [3] элементы множества измерений кадра Ω_{bl100} и множества формуляров каталога $\Omega_{star\ 200}$. При отождествлении пара считается допустимой, если расстояние между ее элементами в СК ПЗС-кадра не превышает наперед заданной константы Δr_{ident} .

Гипотеза о параметрах отождествления кадра и каталога, соответствующая рассматриваемым тройкам первичного отождествления (со стороны каталога и кадра) признается истинной, если в процессе отождествления множеств Ω_{bl100} и $\Omega_{star\ 200}$ часть сформированных допустимых пар превышает наперед заданную константу $V_{min\ ident}$. Константа $V_{min\ ident}$ представляет собой минимальное допустимое отношение количества допустимых пар к размеру множества Ω_{bl100} . Опыт практического использования вычислительного метода, говорит о том, что указанное отношение в среднем случае для истинной гипотезы о параметрах отождествления составляет $0.8 \div 0.9$.

При нахождении гипотезы о параметрах отождествления кадра и каталога, признанной истинной, дальнейшие переборы приостанавливаются. Параметры отождествления, найденные в рамках гипотезы признанной истинной,

считаются искомыми параметрами метода аварийного отождествления. В дальнейшем они используются и уточняются.

Вычислительный метод формирования троек первичного отождествления.

1. Для множества измерений кадра при формировании троек первичного отождествления производится следующая последовательность операций.

1.1. Формирование множества Ω_{bl50} самых ярких измерений кадра состоящее из N_{bl50} претендентов при выборе троек первичного отождествления. С целью обеспечения устойчивости результатов отождествления, кадр делится на $M_{reg} \times M_{reg}$ (M_{reg}^2) частей. Заданное количество измерений кадра N_{bl50} делится на количество фрагментов кадра, и в каждом таком фрагменте отбираются N_{bl50}/M_{reg}^2 , самых ярких измерений кадра.

1.2. Формирование дополнительного множества Ω_{bl100} самых ярких измерений кадра, состоящее из N_{bl100} элементов, равномерно распределенных на кадре (по аналогии с п. 1.1). Множество измерений Ω_{bl100} используется для подтверждения гипотез первичного отождествления (формирования веса очередной гипотезы о соответствии троек кадра и каталога).

2. Для множества формуляров каталога при формировании троек первичного отождествления производится следующая последовательность операций.

2.1. Формирование множества $\Omega_{star100}$ формуляров каталога с учетом равномерного распределения формуляров звезд на исследуемом участке звездного неба.

2.2. Формирование дополнительного множества $\Omega_{star\ 200}$ формуляров каталога состоящее из N_{st200} элементов (с учетом равномерного распределения используемых формуляров звезд на исследуемом участке звездного неба.), которое используется для подтверждения гипотез первичного отождествления (формирования веса очередной гипотезы о соответствии тройки кадра и каталога).

3. Перебор и подтверждение гипотез первичного отождествления.

3.1 Перебор измерений множества Ω_{bl50} как элементов троек первичного отождествления. Измерения, составляющие тройки первичного отождествления должны удовлетворять условиям (8), (9), (14).

3.2 Перебор множества $\Omega_{star100}$ формуляров каталога как элементов троек первичного отождествления со стороны каталога.

3.3. Сопоставление троек первичного отождествления со стороны измерений кадра и со стороны формуляров каталога на основании

соответствующих углов треугольников, значения которых вычислены согласно выражений (19)÷(24).

3.4. Подтверждение гипотезы о параметрах отождествления кадра и каталога, которая соответствует рассматриваемым тройкам первичного отождествления (со стороны каталога и кадра). Гипотеза признается истинной, если в процессе отождествления множеств Ω_{bl100} и $\Omega_{star200}$ часть сформированных допустимых пар превышает наперед заданную константу $v_{min\ ident}$. При подтверждении гипотезы отождествления дальнейший перебор прекращается.

Константы вычислительного метода. При проведении исследований предполагались следующие значения констант вычислительного метода. Количество измерений кадра (претендентов) на роль элементов троек (вершин треугольников) первичного отождествления $N_{bl50} = 50$. Количество элементов множества Ω_{bl100} измерений кадра, используемых для подтверждения гипотез первичного отождествления $N_{bl100} = 100$. Соотношение количества элементов множеств измерений кадра Ω_{bl100} и Ω_{bl50} предполагалось равным $k_{bl\ obs} = N_{bl100} / N_{bl50} = 2$. Количество фрагментов, на которое делится кадр $M_{reg} = 4$. Количество звезд (претендентов) на роль элементов троек (вершин треугольников) первичного отождествления со стороны астрометрического каталога $N_{star100} = 100$. Количество элементов множества звезд $\Omega_{star200}$, используемых для подтверждения гипотез первичного отождествления $N_{star200} = 200$ со стороны астрометрического каталога. Соотношение количества элементов множеств $\Omega_{star200}$ и $\Omega_{star100}$ предполагалось равным $k_{star} = N_{star200} / N_{star100} = 2$. Предельно допустимое минимальное расстояние между второй и первой точками тройки первичного отождествления, выраженное в угловых размерах кадра $k_h = 0.1$. При условии прямоугольного (не квадратного) кадра для определения минимального расстояния между второй и первой точками тройки значение k_h умножается на среднее значение размера кадра по обоим координатам. Минимальная длина $k_{\Delta 12} = 0.3$ перпендикуляра, опущенного от третьей точки тройки первичного отождествления на сторону, проходящую через первую и вторую точки указанной тройки, выраженная в расстояниях между 1-й и 2-й точками тройки.

Предельно допустимое отклонение значений соответствующих углов треугольников (со стороны кадра и каталога) первичного отождествления $\Delta\gamma = 60'$. Предельное максимальное значение расстояния между элементами отождествляемой пары, при которой отождествляемая пара считается допустимой $\Delta r_{ident} = 10$ пикселей. Предельное

минимальное отношение количества допустимых пар к размеру множества Ω_{bl100} составляет $v_{min\ ident} = 0.7$

Определение предельно допустимого отклонения значений соответствующих углов треугольников (со стороны кадра и каталога) первичного отождествления $\Delta\gamma$ методом статистического моделирования.

Ошибки определения значений углов треугольников первичного отождествления определяются ошибками оценки координат положения звезд, используемых в качестве точек-вершин данных треугольников.

Значение среднеквадратических отклонений (СКО) позиционных измерений как правило известны для заданной совокупности условий наблюдения и используемых оборудования и программного обеспечения. Так например, для метода оценки положения объекта на ПЗС кадре, изложенного в работе [7], указанное СКО составляет $1/4$ пикселя.

Два указанных утверждения позволяют использовать метод статистического моделирования [15, 16, 17] для определения такой константы вычислительного метода как предельно допустимое отклонение $\Delta\gamma$ значений соответствующих углов треугольников (со стороны кадра и каталога) первичного отождествления.

При использовании метода статистического моделирования моделируются переменные исследуемой функции (координаты вершин треугольника первичного отождествления) согласно заданным законам распределения (используется нормальное распределение ошибок с нулевым средним и заданной СКО), а значения функции (углы треугольника) вычисляются согласно её определению. Далее вычисляются необходимые статистические характеристики значений функции [18].

В работе для проведения статистического моделирования при моделировании измерений, используемых как вершины треугольников первичного отождествления, применялись метод нормальной аппроксимации [18] и метод Ziggurat [19], генерирующие случайные величины $N_x(0, 1)$, распределенные по нормальному закону с нулевым средним и единичной дисперсией. Для моделирования случайной величины, распределенной по нормальному закону $N_x(m, \sigma^2)$ с математическим ожиданием m и среднеквадратическим отклонением σ , указанный выше результат моделирования случайной величины умножается на значение среднеквадратического отклонения σ , а затем к нему прибавляется значение математического ожидания m :

$$N_x(m, \sigma^2) = \sigma \cdot N_x(0, 1) + m. \quad (30)$$

После моделирования координат вершин треугольников первичного отождествления

определяются значения их углов, согласно выражений (19)÷(24). В качестве предельно допустимого отклонения значений соответствующих углов треугольников (со стороны кадра и каталога) первичного отождествления использовался квантиль на уровне 0.99 модуля ошибки определения значения угла. Выбор такой статистической характеристики случайной величины значения угла треугольника первичного отождествления в качестве предельно допустимого отклонения его значений обосновано предположением, что в качестве точек треугольников первичного отождествления не могут быть использованы измерения с аномально большими отклонениями.

Для моделирования использовались несколько модельных треугольников, все вершины которых отображены на рис. 2. В качестве основания всегда использовались точки, лежащие на оси абсцисс. При этом длина основания составляла 200, 600 и 1000 пикселей. Возможной третьей вершине треугольника соответствуют точки, лежащие на рис. 2 вне оси абсцисс. Возможная длина высоты, соответствующей третьей вершине соответствовала значению 100, 300, 500, 1000 пикселей. Таким образом, основаниями исследуемых треугольников являлись отрезки: C_1B_1 , C_2B_2 , C_3B_3 . В качестве третьих точек (вершин) треугольников использовались точки $A_1, A_2, A_3, A_4, D_1, D_2, D_3, D_4$. Всего в исследовании были использованы 24 треугольника: $C_1A_1B_1, C_1A_2B_1, C_1A_3B_1, C_1A_4B_1, C_1D_1B_1, C_1D_2B_1, C_1D_3B_1, C_1D_4B_1, C_2A_1B_2, C_2A_2B_2, C_2A_3B_2, C_2A_4B_2, C_2D_1B_2, C_2D_2B_2, C_2D_3B_2, C_2D_4B_2, C_3A_1B_3, C_3A_2B_3, C_3A_3B_3, C_3A_4B_3, C_3D_1B_3, C_3D_2B_3, C_3D_3B_3, C_3D_4B_3$.

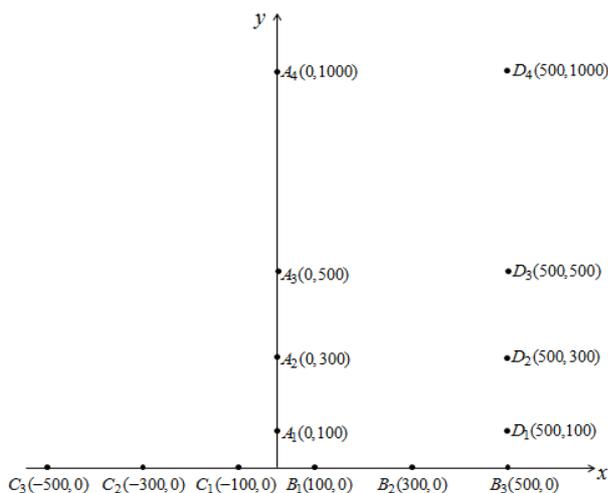


Рис. 2 – Модельные треугольники первичного отождествления

Значения квантилей на уровне 0.99 модуля ошибки определения значения угла, полученные в

результате статистического моделирования, приведены в таблице 1. Анализ указанных данных свидетельствует об обоснованности выбранной константы вычислительного метода $\Delta\gamma = 60'$.

Таблица 1 – Значения квантилей на уровне 0.99 модуля ошибки определения значения угла

№	Треугольник	Длина основания, пиксели	Длина высоты, пиксели	Квантили ошибок определения углов треугольника, угловые минуты		
				$\Delta\gamma_1$	$\Delta\gamma_2$	$\Delta\gamma_3$
1.	$C_1A_1B_1$	200	100	35.04	34.74	31.62
2.	$C_1A_2B_1$	200	300	25.50	35.16	23.88
3.	$C_1A_3B_1$	200	500	24.30	34.74	23.40
4.	$C_1A_4B_1$	200	1000	23.76	35.34	23.16
5.	$C_1D_1B_1$	200	100	23.64	34.68	24.18
6.	$C_1D_2B_1$	200	300	23.70	34.98	23.82
7.	$C_1D_3B_1$	200	500	23.58	34.98	23.70
8.	$C_1D_4B_1$	200	1000	23.64	34.92	23.28
9.	$C_2A_1B_2$	600	100	25.56	11.64	23.94
10.	$C_2A_2B_2$	600	300	11.58	11.70	10.56
11.	$C_2A_3B_2$	600	500	9.48	11.70	8.76
12.	$C_2A_4B_2$	600	1000	8.34	11.64	7.98
13.	$C_2D_1B_2$	600	100	8.70	11.64	9.42
14.	$C_2D_2B_2$	600	300	8.64	11.64	8.94
15.	$C_2D_3B_2$	600	500	8.52	11.70	8.46
16.	$C_2D_4B_2$	600	1000	8.16	11.64	8.04
17.	$C_3A_1B_3$	1000	100	24.35	7.02	23.52
18.	$C_3A_2B_3$	1000	300	9.54	6.96	8.76
19.	$C_3A_3B_3$	1000	500	7.02	6.96	6.36
20.	$C_3A_4B_3$	1000	1000	5.46	6.96	5.04
21.	$C_3D_1B_3$	1000	100	6.30	6.96	6.78
22.	$C_3D_2B_3$	1000	300	5.94	6.96	6.18
23.	$C_3D_3B_3$	1000	500	5.70	7.02	5.70
24.	$C_3D_4B_3$	1000	1000	5.22	7.02	5.04

Выводы

В статье разработан метод аварийного отождествления цифровых кадров с существенной неопределенностью их параметров. Разработанный вычислительный метод предназначен для определения начального приближения параметров отождествления формуляров звездного каталога и измерений кадра с существенной неопределенностью их параметров, связанную с большими ошибками в задании масштаба изображения (фокусного расстояния используемого телескопа) и координат наведения телескопа. Метод включает формирование множества Ω_{bl50} самых ярких измерений кадра и множества $\Omega_{star100}$ формуляров каталога с учетом их равномерного распределения на исследуемом участке звездного неба; формирование дополнительных множеств Ω_{bl100} измерений кадра и $\Omega_{star200}$ формуляров каталога для подтверждения гипотез отождествления; перебор измерений множеств Ω_{bl50} и $\Omega_{star100}$ как элементов троек первичного отождествления от кадра и каталога; сопоставление троек первичного отождествления от кадра и каталога на основании соответствующих значений углов

треугольников, вычисленных согласно выражениям $(19) \div (24)$; подтверждение гипотезы о параметрах отождествления кадра и каталога.

В статье с использованием метода статистического моделирования определено предельно допустимое отклонение значений соответствующих углов треугольников (со стороны кадра и каталога) первичного отождествления $\Delta\gamma$. Анализ указанных данных свидетельствует об обоснованности выбранной константы вычислительного метода $\Delta\gamma = 60'$.

Вычислительный метод аварийного отождествления цифровых кадров с существенной неопределенностью их параметров апробирован в программном обеспечении автоматического поиска астероидов и комет на серии ПЗС-кадров CoLiTec [7, 8]. Всего с помощью программы CoLiTec открыто 4 кометы, более 1560 астероидов, среди которых 4 объекта сближающихся с Землей, 21 троянский астероид Юпитера и 1 кентавр. Результаты ПО CoLiTec подтверждают достоверность и надежность работы предложенного в статье вычислительного метода.

Дальнейшие исследования целесообразно сконцентрировать на оптимизации параметров разработанного метода.

Список литературы

1. **Angryk, R. A.** Special Section: Management, Search and Analysis of Solar Astronomy Big Data / **R. A. Angryk, A. Csillaghy, P. C. Martens** // *Astronomy and Computing* – 2015. – Vol. 13. – P. 85-85. – doi:10.1016/j.ascom.2015.11.001.
2. **Singh, N.** Parallel astronomical data processing with Python: Recipes for multicore machines / **N. Singh, L. Browne, R. Butler** // *Astronomy and Computing* – 2013. – Vol. 2. – P. 1-10. – doi:10.1016/j.ascom.2013.04.002.
3. **Дихтяр, Н. Ю.** Метод отождествления астрономических измерений CCD-кадра с формулярами звездного каталога / **Н. Ю. Дихтяр, Я. С. Мовсесян, В. Е. Саваневич, А. Б. Брюховецкий** // *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н. Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т»*. – 2015. – Вып. 67. – С. 197-215.
4. **Hogg, D. W.** Automated Astrometry / **D. W. Hogg, M. Blanton, D. Lang et al.** // *Astronomical Data Analysis Software and Systems XVII* – 2008. – 394. – P. 27-34
5. **Lang, D.** Blind astrometric calibration of arbitrary astronomical images / **D. Lang, D. W. Hogg, K. Mierle et al.** // *Astrometry.net*. – 2010. – 46 p.
6. **Lang, D.** Measuring the undetectable: Proper motions and parallaxes of very faint sources / **D. Lang, D. W. Hogg, S. Jester et al.** // *The Astronomical Journal*. – 2009. – Volume 137, Issue 5. – P. 4400-4411.
7. **Savanevych, V. E.** A new method based on the subpixel Gaussian model for accurate estimation of asteroid coordinates / **V. E. Savanevych, O. B. Briukhovetskyi, N. S. Sokovikova, M. M. Bezkrivny, I. B. Vavilova, Yu. M. Ivashchenko, L. V. Elenin, S. V. Khlamov, Ia. S. Movsesian, A. M. Dashkova, A. V. Pogorelov** // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, – 2015. – Т. 451 (3). – С. 3287-3298.
8. **Savanevych, V. E.** Comparative analysis of the positional accuracy of CCD measurements of small bodies in the solar system software CoLiTec and Astrometrica / **V. E. Savanevych, A. B. Briukhovetskyi, Yu. N. Ivashchenko, I. B. Vavilova, M. M. Bezkrivny, E. N. Dikov, V. P. Vlasenko, N. S. Sokovikova, Ia. S. Movsesian, N. Yu. Dikhtyar, L. V. Elenin, A. V. Pohorelov, S. V. Khlamov** // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies* – 2015. – Т. 31 (6). – P. 302-313
9. **Дихтяр, Н. Ю.** Метод предварительного отождествления измерений цифровых кадров одной серии / **Н. Ю. Дихтяр, Я. С. Мовсесян, В. Е. Саваневич** // *Збірник наукових праць. Вісник НТУ «ХПІ», Серія «Нові рішення в сучасних технологіях»* – 2015. – №62 (1171) – С. 58 - 63.
10. **Дума, Д. П.** Загальна астрометрія. Навчальний посібник / **Д. П. Дума**. – Київ: Наукова думка. – 2007. – 600 с.
11. **Киселев, А. А.** Теоретические основания фотографической астрометрии / **А. А. Киселев**. – М.: Наука. – 1989. – 264 с.
12. **Саваневич, В. Е.** Оценка экваториальных координат астероида по оценкам его координат на ПЗС-кадре / **В. Е. Саваневич, А. Б. Брюховецкий, А. М. Кожухов, Е. Н. Диков** // *Системы обработки информации: Зб. наук. пр.* – Харків: ХУПС. – 2010. – Вип. 6(87). – С. 172 - 179.
13. **Бортаковский, А. С.** Аналитическая геометрия в примерах и задачах: Учеб. Пособие / **А. С. Бортаковский, А. В. Пантелеев**. – М.: Высш. шк. – 2005. – 496 с.
14. **Молотов, И. Е.** Научная сеть оптических инструментов для астрометрических и фотометрических наблюдений. // **И. Е. Молотов, В. М. Агапов, В. В. Куприянов и др.** // *Известия Главной астрономической обсерватории в Пулкове*. – 2009. – № 219, вып. 1. – С. 233-248.
15. **Лемешко, Б. Ю.** Статистический анализ данных, моделирование и исследование вероятностных закономерностей. Компьютерный подход: монография / **Б. Ю. Лемешко, С. Б. Лемешко, С. Н. Постовалов, Е. В. Чимитова** // Новосибирск: Изд-во НГТУ. – 2011. – 888 с.
16. **Воробьев, С. Н.** Статистическое моделирование информационных систем / **С. Н. Воробьев, Н. В. Гирина, И. В. Лазарев, Л. А. Осипов** // Изд-во ГУАП. – 2010. – 151 с.
17. **Kroese, D. P.** Statistical Modeling and Computation / **D. P. Kroese, J. C. S. Chan** // Springer. – 2014. – doi:10.1007/978-1-4614-8775-3.
18. **Кобзарь, А. И.** Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников / **А. И. Кобзарь**. – М.: ФИЗМАТЛИТ. – 2006. – 816 с.
19. **Marsaglia, G.** Ziggurat Method for Generating Random Variables / **G. Marsaglia, W. W. Tsang** // *Journal of Statistical Software*. – 2000. – Т. 5 (8). – P. 1-7.

Bibliography (transliterated)

1. **Angryk, R. A., Csillaghy, A., Martens, P. C.** Special Section: Management, Search and Analysis of Solar Astronomy Big Data. *Astronomy and Computing*, 2015, **13**, 85-85, doi:10.1016/j.ascom.2015.11.001.
2. **Singh, N., Browne, L., Butler, R.** Parallel astronomical data processing with Python: Recipes for multicore machines, *Astronomy and Computing*, 2013, **2**, 1-10, doi:10.1016/j.ascom.2013.04.002.

3. **Dikhtyar, N. Yu., Movsesyan, Ia. S., Savanevich, V. E., Bryukhovetskiy, A. B.** Metod otzhdestvleniya astronomicheskikh izmereniy CCD-kadra s formulyarami zvezdnogo kataloga [The method of identification of astronomical measurements CCD-frame to form the star catalog]. *Otkrytye informatsionnye i komp'yuternye integrirovannye tekhnologii: sb. nauch. tr. Nats. aerokosm. un-ta im. N. E. Zhukovskogo «Khar'k. aviats. in-t» [Public information and computer integrated technologies: Sat. scientific. tr. Nat. aerokosm. Zap them. NE Zhukovsky "Kharkiv. aviation. Inst "], 2015, 67, 197-215.*
4. **Hogg, D. W., Blanton, M., Lang, D. et al.** Automated Astrometry. *Astronomical Data Analysis Software and Systems XVII*, 2008, **394**, 27-34
5. **Lang, D., Hogg, D. W., Mierle, K. et al.** Blind astrometric calibration of arbitrary astronomical images. *Astrometry.net*, 2010, 46 p.
6. **Lang, D., Hogg, D. W., Jester, S. et al.** Measuring the undetectable: Proper motions and parallaxes of very faint sources. *The Astronomical Journal*, 2009, **5(137)**, 4400-4411.
7. **Savanevych, V. E Briukhovetskiy, O. B. Sokovikova et al.** A new method based on the subpixel Gaussian model for accurate estimation of asteroid coordinates. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2015, **451(3)**, 3287-3298.
8. **Savanevych, V. E., Briukhovetskiy, A. B., Ivashchenko, Yu. N. et al.** Comparative analysis of the positional accuracy of CCD measurements of small bodies in the solar system software CoLiTec and Astrometrica. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*, 2015, **31 (6)**, 302-313.
9. **Dikhtyar, M., Movsesian, Ia., Savanevych, V.** Method for identification a preliminary measurements of digital frames of the one series. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2015, **62 (1171)**, 58- 63.
10. **Duma, D. P.** Zagal'na astrometriya. Navchal'niy posibnik [Total astrometry. Tutorial]. Kiiv: Naukova dumka, 2007, 600 p.
11. **Kiselev, A. A.** Teoreticheskie osnovaniya fotograficheskoy astrometrii [The theoretical foundation of photographic astrometry]. Moskva: Nauka, 1989, 264 p.
12. **Savanevich, V. E., Bryukhovetskiy, A. B., Kozhukhov, A. M., Dikov, E. N.** Otsenka ekvatorial'nykh koordinat asteroida po otsenkam ego koordinat na PZS-kadre [Evaluation of the equatorial coordinates of asteroid on its estimates of coordinates on the CCD frame] *Sistemi obrobki informatsii: Zb. nauk. pr. [Sistemi obrobki Informácie]* – Kharkiv: KhUPS, 2010, **6(87)**, 172 - 179.
13. **Bortakovskiy, A. S., Pantelev, A. V.** Analiticheskaya geometriya v primerakh i zadachakh: Ucheb. Posobie. [Analytic geometry in examples and problems: Textbook. benefit]. Moskva: Vyssh. shk., 2005, 496 p.
14. **Molotov, I. E., Agapov, V. M., Kupriyanov, V. V. et al.** Nauchnaya set' opticheskikh instrumentov dlya astrometricheskikh i fotometricheskikh nablyudeniy [The scientific network of optical instruments for astrometric and photometric observations]. *Izvestiya Glavnoy astronomicheskoy observatorii v Pulkove [Proceedings of the Main Astronomical Observatory at Pulkovo]*, 2009, **1(219)**, 233-248.
15. **Lemeshko, B. Yu., Lemeshko, S. B., Postovalov, S. N., Chimitova, E. V.** Statisticheskii analiz dannykh, modelirovanie i issledovanie veroyatnostnykh zakonomernostey. Komp'yuternyy podkhod: monografiya [Statistical data analysis, modeling and study of the laws of probability. Computer approach: Monograph]. Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2011, 888 p.
16. **Vorob'yev, S. N., Girina, N. V., Lazarev, I. V., Osipov, L. A.** Statisticheskoe modelirovanie informatsionnykh sistem [Statistical modeling of information systems] Izd-vo GUAP, 2010, 151 p.
17. **Kroese, D. P., Chan, J. C. C.** Statistical Modeling and Computation. Springer, 2014, doi:10.1007/978-1-4614-8775-3.
18. **Kobzar', A. I.** Prikladnaya matematicheskaya statistika. Dlya inzhenerov i nauchnykh rabotnikov [Applied mathematical statistics. For engineers and scientists]. Moskva: FIZMATLIT, 2006, 816 p.
19. **Marsaglia, G., Tsang, W. W.** Ziggurat Method for Generating Random Variables. *Journal of Statistical Software*, 2000, **5(8)**, 1-7.

Сведения об авторах (About authors)

Диктяр Николай Юрьевич – аспирант кафедры Электронных вычислительных машин, Харьковского национального университета радиоэлектроники, г. Харьков, Украина; e-mail: mdihtyar@gmail.com

Dikhtyar Mykola – graduate student of Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, UKRAINE, e-mail: mdihtyar@gmail.com

Мовсесян Яна Самвеловна – аспирант кафедры Электронных вычислительных машин, Харьковского национального университета радиоэлектроники, г. Харьков, Украина; e-mail: movsesian.iana@gmail.com

Movsesian Iana – graduate student of Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, UKRAINE, e-mail: e-mail: movsesian.iana@gmail.com

Саваневич Вадим Евгеньевич – д.т.н., профессор, кафедра информационных управляющих систем и технологий, Ужгородский национальный университет, Ужгород; e-mail: vadyam@savanevych.com

Savanevych Vadym – Doctor of Technical Sciences Professor, Department of information management systems and technologies, Uzhgorod National University, Uzhgorod, Ukraine; e-mail: vadyam@savanevych.com

Хламов Сергей Васильевич – ученая степень, ученое звание, отдел/кафедра, место работы, город; e-mail: movsesian.iana@gmail.com

Khlamov Sergii – graduate student of Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, UKRAINE, e-mail: e-mail: movsesian.iana@gmail.com

Пожалуйста ссылаетесь на эту статью следующим образом:

Дихтяр Н. Ю. Метод аварийного отождествления цифровых кадров с существенной неопределенностью их параметров / **Н. Ю. Дихтяр, Я. С. Мовсесян, В. Е. Саваневич, С.В. Хламов** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2016. – № 18 (1190). – С. 128-139. – doi:10.20998/2413-4295.2016.18.19.

Please cite this article as:

Dikhtyar, M. Movsesian, Ia. Savanevych, V. Khlamov, S. The method of emergency identification of the digital frame with substantial uncertainty of their parameters the method of emergency identification of the digital frame with substantial uncertainty of their parameters. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016, **18** (1190), 128-139. – doi:10.20998/2413-4295.2016.18.19.

Будь ласка посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Діхтяр, М. Ю. Метод аварійного ототожнення цифрових кадрів з істотною невизначеністю їх параметрів / **М. Ю. Діхтяр, Я. С. Мовсесян, В. Є. Саваневич, С. В. Хламов** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2016. – № 18 (1190). – С. 128-139. – doi:10.20998/2413-4295.2016.18.19.

АНОТАЦІЯ У статті розроблено обчислювальний метод аварійного ототожнення цифрових кадрів з істотною невизначеністю їх параметрів. Розроблений обчислювальний метод призначений для визначення початкового наближення параметрів ототожнення формулярів зоряного каталогу і вимірювань кадру з істотною невизначеністю їх параметрів, яка пов'язана з великими помилками в завданні масштабу зображення (фокусної відстані використовуваного телескопа) і координат наведення телескопа .. Розроблений обчислювальний метод апробований в програмному забезпеченні автоматичного пошуку астероїдів і комет на серії ПЗЗ-кадрів CoLiTec. Результати ПО CoLiTec підтверджують достовірність і надійність роботи запропонованого в статті обчислювального методу.

Ключові слова: цифровий кадр, аварійне ототожнення, постійні пластинки, первинне ототожнення, вимір кадру, формуляр каталогу.

Поступила (received) 18.05.2016