

## ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ АЛГОРИТМ СЕГМЕНТАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ЗВЕЗДНОГО НЕБА, ПОЛУЧЕННЫХ ОТ ДАТЧИКОВ СКАНЕРНОГО ТИПА

**Пашенцев Д.Ю.**, инженер-программист отдела 4374 филиала ФГУП «ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс» – «ОКБ «Спектр»», *pashentsev62@mail.ru*

**Акимов А.А.**, инженер-программист отдела 4374 филиала ФГУП «ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс» – «ОКБ «Спектр»», *aaa\_akimov@mail.ru*

**Скирумнт В.К.**, начальник центра 1130 ФГУП «ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс», *skir@list.ru*

**Тишкин Р.В.**, начальник отдела 4374 филиала ФГУП «ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс» – «ОКБ «Спектр»», *roman.tishkin@mail.ru*

**Ключевые слова:** дистанционное зондирование Земли, сегментация, бинаризация, высокоскоростной алгоритм.

### Введение

Системы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) находят эффективное применение во многих отраслях народного хозяйства: гидрометеорологии, контроле окружающей среды, геологии, сельском и лесном хозяйствах, военной разведке и др. Однако в исходном виде изображения, формируемые с помощью различных систем ДЗЗ, не могут быть использованы по назначению, поскольку имеют значительные геометрические искажения по отношению к объектам наблюдаемой сцены. Для проведения высокоточной автоматической геометрической коррекции видеоданных, получаемых при ДЗЗ, необходимо знать элементы внутреннего и внешнего ориентирования съёмочного устройства и космического аппарата. К элементам внешнего ориентирования космического аппарата относятся данные, полученные от гироскопических систем, звёздных и солнечных датчиков и систем позиционирования, таких как ГЛОНАСС и GPS. К элементам внутреннего ориентирования съёмочной аппаратуры относятся: дисторсия объектива, координаты главной точки оптики, расположение фотоприёмных матриц (ПЗС-матриц) в фокальной плоскости и фокусное расстояние.

Параметры, относящиеся к внутреннему ориентированию съёмочной аппаратуры [1], измеряются при ее наземной калибровке, и их точность во многом определяет качество дальнейшей обработки полученных изображений. Однако конфигурация ПЗС-матриц меняется под различными воздействиями, возникающими при выводе космического аппарата на орбиту, а также из-за теплового влияния Солнца. Встаёт задача калибровки съёмочной аппаратуры не только в лабораторных условиях, но и в штатном режиме эксплуатации.

Анализ зарубежных публикаций [2-4] показал, что для решения задач полётной калибровки используются опорные геодезические полигоны с большим числом опорных точек (GCP). Однако такой подход требует создания специальных полигонов [5].

Альтернативным способом является калибровка по звёздному небу [6]. Космический аппарат отклоняется по крену на заданный угол и проводит съёмку звёзд (Рис. 1). В данном случае в качестве опорного полигона выступает высокоточный звёздный каталог (ВЗК).

*Предложен высокоскоростной алгоритм сегментации изображений звёздного неба. Приведены основные этапы сегментации, а также сравнительные результаты в части быстродействия применительно к обработке изображений звёздного неба.*



Рис. 1. Съёмка звёздного неба

Основными задачами режима калибровки по звёздному небу являются:

- определение параметров дисторсии объектива;
- уточнение паспортных значений параметров установок ПЗС-матриц и фотограмметрических параметров;
- оценка фокусного расстояния;
- оценка точности определения параметров внутреннего ориентирования.

В данном режиме, в отличие от калибровки по наземным полигонам, исключается искажающее действие кривизны Земли; эллиптичности орбиты, влияния атмосферы и рельефа местности.

Для идентификации одноименных звёзд как реально наблюдаемых, так и их аналогов из астрокаталога, необходимо выполнить предварительную обработку реального изображения звёздного неба. Основным этапом такой обработки является сегментация изображения (с целью выделения звёзд и определения их координат).

Спутниковые снимки высокого разрешения участков звёздного неба могут превышать объём более 40 Гбайт. Существующие алгоритмы сегментации не обеспечивают необходимую скорость решения этой задачи, что не позволяет производить обработку

данных ДЗЗ в темпе их получения.

В настоящей работе предлагается алгоритм сегментации изображения звёздного неба полученного от датчиков сканерного типа, свободный от указанных недостатков.

Для реализации высокоскоростного алгоритма необходимо построить эталонный кадр (ЭК) по данным ВЗК в системе координат изображения, представляющий собой опорную координатную информацию звёзд в системе координат изображения.

При использовании фотографических снимков построение эталонного кадра на изображении осуществляется стандартными методами фотограмметрии. Однако для сканерных снимков, вследствие немгновенности получения изображения кадра от оптико-электронного преобразователя (ОЭП), центральную проекцию можно считать лишь в строке, которая получается мгновенно.

При этом космическим изображениям звёздного неба, полученным оптико-электронной съёмочной системой, присущи геометрические искажения, обусловленные эллиптичностью орбиты, ошибками изготовления и установки системы управления (СУ) и систем космического аппарата (КА). Эти геометрические искажения носят постоянный, систематический и случайный характер.

**Формирование идеального кадра**

Для построения идеального кадра необходимо наличие информации о движении визирной системы координат относительно инерциальной и выбора в заданных областях экваториальных координат звезд ( $\alpha, \delta$ ) из астрокаталога, например tycho2 [7]. Отклонение расположения звёзд на изображении (из-за воздействия ряда факторов) относительно идеального не превышают минимального расстояния между группами звёзд в заданном участке.

Инерциальная система координат (ИСК). Система координат, центр которой совпадает с центром Земли. Ось OX направлена в сторону весеннего равноденствия, ось OZ направлена на северный полюс Земли, ось OY дополняет систему до правой тройки [1].

Визирная система координат (ВСК). Система координат, центр которой расположен в главной точке ОЭП, ось OX совпадает с визирующим лучом ОЭП, ось OZ направлена вдоль ПЗС-матриц ОЭП, ось OY дополняет систему до правой тройки [1].

Отметим, что из-за бесконечно малого параллакса звёзд центры ВСК и ИСК удобно расположить в одной точке (например, в центре Земли) [8].

Звезда фиксируется ОЭП тогда, когда луч-вектор звезды S попадет на одну из ПЗС-матриц в фокальной плоскости (эта плоскость совпадает с плоскостью YOZ визирной системы координат) ОЭП. Рассмотрим следующий схематичный рисунок (Рис. 2.).

Произвольная звезда S в визирной системе координат характеризуется радиус-вектором  $V_s$ , являющимся вектором-направлением звезды S в ВСК.

$$V_s = \begin{pmatrix} F \\ -Y \\ -Z \end{pmatrix}, \tag{1}$$

где F – фокусное расстояние ОЭП, Z и Y – координаты точки проекции звезды S на плоскость YOZ в ВСК.

Этот вектор можно определить, имея экваториальные координаты звезды S прямое восхождение  $\alpha$ , склонение  $\delta$  и кватернион ориентации ВСК относительно ИСК в момент времени  $t_0$  [9]. Тогда:

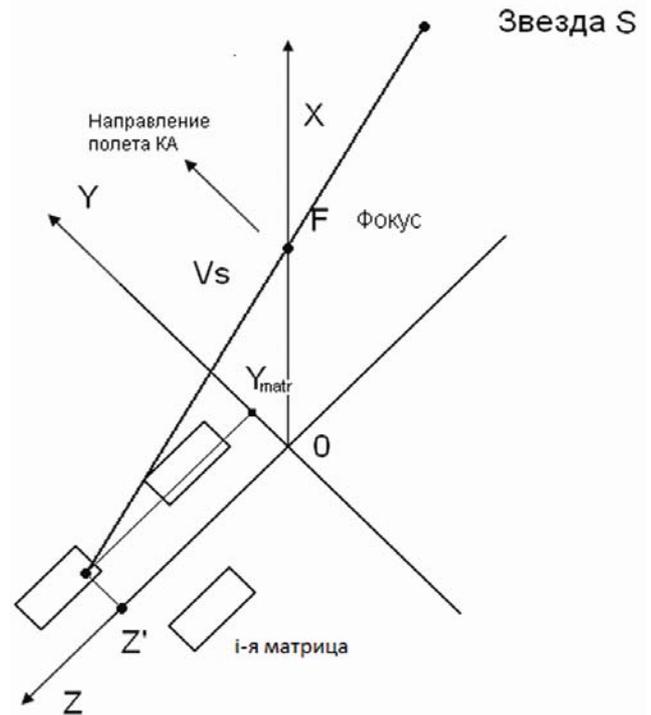


Рис. 2. Расположение ПЗС-матриц в фокальной плоскости ОЭП

$$V_{sn} = L(t_0)^{-1} \circ R \circ L(t_0), \tag{2}$$

$$\text{где } R = \begin{pmatrix} \cos(\alpha) \cdot \cos(\delta) \\ \sin(\alpha) \cdot \cos(\delta) \\ \sin(\delta) \end{pmatrix},$$

$L(t_0)$  – кватернион ориентации визирной системы координат в момент времени  $t_0$ .

Начальный момент времени формирования изображения  $t_{нач}$  положим равным нулю.

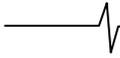
Рассмотрим кватернионную функцию от времени вращения визирной системы координат в инерциальной системе координат:

$$L(t) = \begin{pmatrix} L_0(t) \\ L_1(t) \\ L_2(t) \\ L_3(t) \end{pmatrix} \tag{3}$$

Для дальнейших рассуждений примем, что функция обладает свойством непрерывности, кроме того, для двух произвольных моментов времени  $t_1$  и  $t_2$  и произвольного вектора R, заданного в ИСК, должно выполняться условие: если для  $t_1$  и  $t_2$  проекции вектора R в визирную систему координат совпадают, то  $t_1 = t_2$ .

Непрерывность означает, что сканирование звёздного неба происходит без пропусков. Условие равенства двух моментов времени исходит из физического смысла фотографирования (на разных строках изображения не будет одних и тех же звёзд, по крайней мере, для одной конкретной матрицы).

По известным формулам можно выразить функцию матрицы перехода через кватернион [9]:



$$\begin{aligned}
 c_{11}(t) &= \lambda_0^2(t) + \lambda_1^2(t) - \lambda_2^2(t) - \lambda_3^2(t) \\
 c_{12}(t) &= 2 \cdot (\lambda_1(t) \cdot \lambda_2(t) + \lambda_0(t) \cdot \lambda_3(t)) \\
 c_{13}(t) &= 2 \cdot (\lambda_1(t) \cdot \lambda_3(t) + \lambda_0(t) \cdot \lambda_2(t)) \\
 c_{21}(t) &= 2 \cdot (\lambda_1(t) \cdot \lambda_2(t) - \lambda_0(t) \cdot \lambda_3(t)) \\
 c_{22}(t) &= \lambda_0^2(t) - \lambda_1^2(t) + \lambda_2^2(t) - \lambda_3^2(t) \\
 c_{23}(t) &= 2 \cdot (\lambda_2(t) \cdot \lambda_3(t) - \lambda_0(t) \cdot \lambda_1(t)) \\
 c_{31}(t) &= 2 \cdot (\lambda_1(t) \cdot \lambda_3(t) - \lambda_0(t) \cdot \lambda_2(t)) \\
 c_{32}(t) &= 2 \cdot (\lambda_2(t) \cdot \lambda_3(t) - \lambda_0(t) \cdot \lambda_1(t)) \\
 c_{33}(t) &= \lambda_0^2(t) - \lambda_1^2(t) - \lambda_2^2(t) - \lambda_3^2(t)
 \end{aligned} \quad (4)$$

Тогда вектор  $\mathbf{R}$  звезды в ВСК можно выразить как:

$$\mathbf{V}_{sn} = \mathbf{C} \cdot \mathbf{R}$$

Геометрическое расположение ПЗС-матрицы таково, что координата  $Y$  в ВСК первой строки ПЗС-матрицы равна постоянной величине  $Y_{matr}$  (в идеальном неискаженном случае [1]). Необходимым условием попадания звезды  $S$  на ПЗС-матрицу будет условие равенства координаты  $Y$  в векторе  $\mathbf{V}_s$  и  $Y_{matr}$ :

$$-V_s^{[2]} = Y = Y_{matr} \quad (5)$$

Учитывая матрицу  $\mathbf{C}$ , необходимое условие запишем следующим образом:

$$-F \cdot \frac{c_{21}(t) \cdot R_1 + c_{22}(t) \cdot R_2 + c_{23}(t) \cdot R_3}{c_{11}(t) \cdot R_1 + c_{12}(t) \cdot R_2 + c_{13}(t) \cdot R_3} = -V_s^{[2]} = Y = Y_{matr}, \quad (6)$$

для момента времени  $t$ .

Если положить, что  $\frac{Y_{matr}}{F} = \tilde{y}_0$ , то выражение (6)

можно записать в следующем виде:

$$\left( c_{21}(t) - \tilde{y}_0 \cdot c_{11}(t) \right) \cdot R_1 + \left( c_{22}(t) - \tilde{y}_0 \cdot c_{12}(t) \right) \cdot R_2 + \left( c_{23}(t) - \tilde{y}_0 \cdot c_{13}(t) \right) \cdot R_3 = 0 \quad (7)$$

В силу сделанных предположений относительно функции  $L(t)$ , можно заключить, что на промежутке построения эталонного кадра функция (7) монотонна, значит, она имеет одно решение или не имеет решения вовсе, что всегда можно проверить, найдя значения функции на крайних точках временного отрезка [10].

Решив уравнение (7), найдем время, для которого выполняется необходимое условие (5). После чего проверим второе необходимое условие попадания звезды на ПЗС-матрицу, а именно – вычислим координату  $Z$  и посмотрим, принадлежит ли значение этой координаты множеству значений координаты  $Z$  пикселей первой строки ПЗС-матрицы. Координата  $Z$  будет рассчитываться как:

$$-F \cdot \frac{c_{31}(t) \cdot R_1 + c_{32}(t) \cdot R_2 + c_{33}(t) \cdot R_3}{c_{11}(t) \cdot R_1 + c_{12}(t) \cdot R_2 + c_{13}(t) \cdot R_3} = Z, \quad (8)$$

для вычисленного значения  $t$ .

Таким образом, выполнение этих двух условий является необходимым и достаточным для попадания звезды на ПЗС-матрицу.

При выполнении необходимого и достаточного условий попадания звезды  $S$  на матрицу ПЗС можно определить ее координаты на изображении, где

координата  $Z$  (номер пикселя) рассчитывается по формуле (8), а координата  $Y$  (номер строки) – с использованием найденного времени попадания звезды, а также частоты формирования строк.

После построения идеального кадра, для выделения и вычисления координат звезд в области просмотра, можно использовать один из существующих методов сегментации.

Сегментацию можно разбить на два этапа:

1. Выбор порога сегментации;  
В свою очередь, порог сегментации может быть определен двумя методами:
  - глобально-оптимальный метод (метод Оцу);
  - локально-адаптивный;
2. Задача разметки и параметризации.

**Глобальный оптимальный порог (метод Оцу).** Метод Оцу (Otsu's Method) использует гистограмму изображения для расчёта порога.

Пример изображения с объектом:

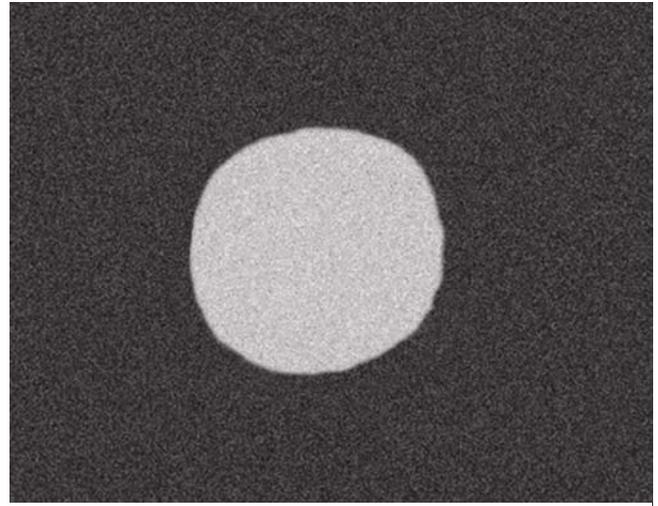


Рис. 3. Тестовое изображение

Гистограмма для такого изображения:

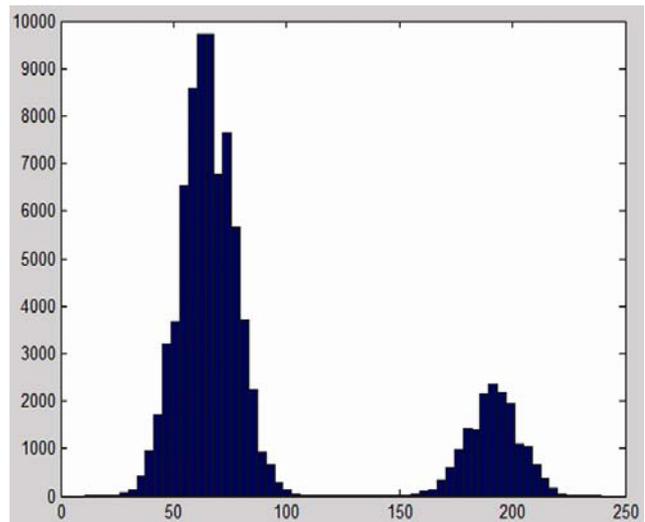


Рис. 4. Распределение гистограммы для тестового изображения

Из гистограммы видно, что имеются два четко разделяющихся класса. Выбор порога в данном методе сводится к минимизации внутриклассовой дисперсии, которая определяется как взвешенная сумма дисперсий двух классов:

$$\sigma_w^2 = w_1 \sigma_1^2 + w_2 \sigma_2^2. \quad (9)$$

Здесь  $w_1$  и  $w_2$  – вероятности первого и второго классов, соответственно. При этом минимизация внутриклассовой дисперсии эквивалента максимизации межклассовой дисперсии, которая равна:

$$\sigma_b^2 = w_1 w_2 (a_1 - a_2)^2. \quad (10)$$

В этой формуле  $a_1$  и  $a_2$  – средние арифметические значения для каждого из классов.

Особенность этой формулы заключается в том, что  $w_1(t+1)$ ,  $w_2(t+1)$ ,  $a_1(t+1)$ ,  $a_2(t+1)$  легко выражаются через предыдущие значения  $w_1(t)$ ,  $w_2(t)$ ,  $a_1(t)$ ,  $a_2(t)$  ( $t$  – текущий порог).

**Локальный адаптивный порог.** Идея метода состоит в том, что яркость каждого пикселя сравнивается со средним значением яркости пикселей, входящих в окрестность первого. Если яркость обрабатываемого пикселя на  $t$  процентов меньше среднего значения окрестности, то оно принимает значение 0, в противном случае 1.

Для ускорения вычисления среднего значения в окрестности (окне) обрабатываемого пикселя перед основным циклом обработки строится матрица (интегральное изображение, Integral Image), позволяющая вычислить среднее значение за постоянное время вне зависимости от размера окна.

Интегральное изображение (матрица сумм) – это инструмент, который можно использовать, когда имеется функция от пикселя, принимающая целочисленные значения (например, яркость) и необходимо вычислить суммарное значение этой функции на части изображения.

**Алгоритм высокоскоростной сегментации**

Пусть имеется космическое изображение звёздного неба  $B(m,n)$ , в системе координат  $m,n$ , в которой при идеально точной координатной привязке опорные объекты (звёзды) изображения должны совпадать с одноименными объектами эталонного кадра, представленной в этой же системе координат.

На заданный регион съёмки формируется достаточно точный ЭК  $E(m,n)$  в системе координат  $m,n$ . Предварительно на ЭК имеем множество звёзд с координатами центров в точках  $(m_{ei}, n_{ei})$ ,  $i = 1, I$ .

С учетом сказанного высокоскоростной алгоритм сегментации в задаче локализации центров звезд на изображении  $B(m,n)$  включает следующие этапы:

1. Осуществляется выборка звёзд ЭК, имеющих координаты в системе координат  $m,n$ .

2. Затем для каждой звезды  $S_e \in E$  производится построение фрагмента  $\Omega_e$  выполнения сегментации. Границу данного фрагмента оператор подбирает на этапе визуального контроля изображения  $B(m,n)$ .

3. Далее для каждого фрагмента  $\Omega_e$  выполняется поиск фрагмента  $\Omega_b$  исходного изображения. На рис. 5 представлено изображение звёзд, для которого найдены фрагменты  $\Omega_b$ . При этом размеры фрагментов равны  $\Omega_{re} = \Omega_{rb}$ .

4. Затем каждый фрагмент  $\Omega_b$  сегментируется по одному из выше приведенных алгоритмов сегмента-

ции, и выполняется локализация найденного фрагмента звезды изображения  $B(m,n)$ .

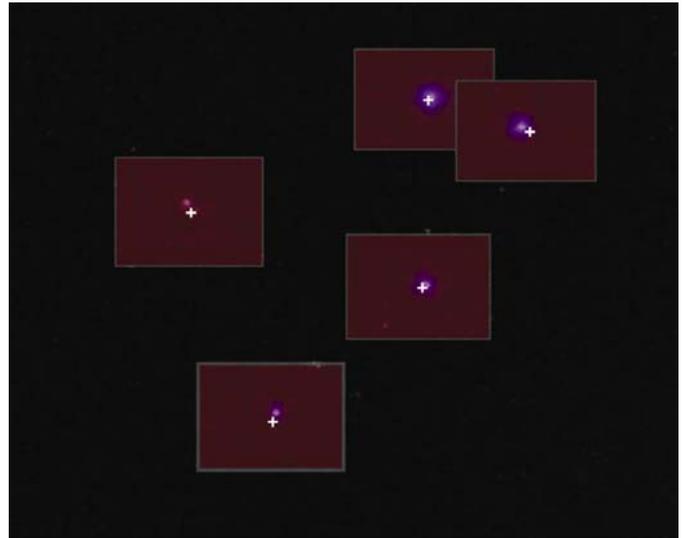


Рис. 5. Изображение звёздного неба с выделенными фрагментами  $\Omega_b$



Рис. 6. Обобщённый алгоритм высокоскоростной сегментации снимка звёздного неба

Функциональная блок-схема алгоритма приведена на рис. 6. В таблице 1 приведено сравнение выполнения сегментации методом локально адаптивного порога с использованием высокоскоростного алгоритма и без. Ниже приведены характеристики тестового изображения:

- ширина – 54000 пикселей;

- высота – 16660 пикселей;
- звёзд – 109.

Длительность сегментации изображения без применения высокоскоростного алгоритма составила приблизительно 12 секунд. Количество распознанных звёзд 105.

Необходимо отметить, что реального изображения нет, и оно моделируется [11].

Как видно из таблицы 1, оптимальный размер окна сканирования находится в области 250-350 пикселей. Время на обработку файла сократилось приблизительно в 36 раз. Применение предложенного алгоритма на других изображениях звёздного неба получены схожие результаты в части быстродействия. Данный алгоритм позволяет уменьшить вычислительные затраты на сегментацию полученных изображений звёздных узоров в случае наличия априорной информации по движению космического аппарата.

При этом следует отметить, что скорость обработки можно увеличить еще больше в случае использования параллельных методов обработки.

Таблица 1

Размер окна сканирования, пиксели	Время, сек	Кол-во найденных точечных источников
400	0,8	105
350	0,406	105
300	0,328	105
250	0,250	105
200	0,203	105
150	0,25	105
100	0,172	102
50	0,078	64
25	0,057	35

### Заключение

В работе рассмотрен высокоскоростной алгоритм сегментации изображений звёздного неба, полученных от датчиков сканерного типа. Предложен метод построения идеального кадра для высокоскоростной сегментации изображения звёздного неба. Использование алгоритма, основанного на априорных данных положений звёзд,

позволило сократить время обработки изображений звёздного неба приблизительно в 36 раз.

### Литература

1. Бакланов А.И. Системы наблюдения и мониторинга: учебное пособие – М. Бином. Лаборатория знаний, 2009. – С. 234.
2. Jacobsen, K.: Issues and Method for In-Flight and On-Orbit Calibration // Workshop on Radiometric and Geometric Calibration, Gulfport, 2003.
3. Valorge C., Meygret A., Lebegue L., Henry P: Forty years of experience with SPOT in-flight Calibration // Workshop on Radiometric and Geometric Calibration, Gulfport, 2003.
4. Jacobsen K. Calibration of imaging satellite sensors // Institute of Photogrammetry and GeoInformation, University of Hannover.
5. ОКР «Регион В-Валидация», «Создание системы валидационных подспутниковых наблюдений». Проект ТЗ на открытый конкурс. // <http://doc.gostorgi.ru/701/2010-06-02/790730/9.doc>
6. Петрищев В.Ф. Полётная фотограмметрическая калибровка оптико-электронной аппаратуры дистанционного зондирования Земли по звёздному небу // Полёт. – 2005. – N7. – С. 39-42
7. Цветков А.С. Руководство по работе с астрокаталогом Туcho-2. – СПб., 2005.
8. Бакулин П.И., Кононович Э.В., Мороз В.И. Курс общей астрономии. Изд-во «Наука», М., 1970 г., С. 536.
9. Бранец В.Н., Шмыглевский И.П. Применение кватернионов в задачах ориентации твёрдого тела.// Главная редакция физико-математической литературы. Изд-во «Наука», М., 1973, – С. 320.
10. Зорич В.А. Математический анализ. Часть I. Изд. 2-е, испр. И доп. М.: ФАЗИС, 1997. – XIV – С. 554.
11. Акимов А.А., Пашенцев Д.Ю., Пылькин А.Н., Тишкин Р.В. Моделирование точечных изображений звёздного неба, получаемых от датчика сканерной съёмки // Наука и технологии. – Труды XXX Российской школы, посвящённой 65-летию Победы. – М.: РАН. 2010, – С. 386.

**A.A. Akimov, V.K. Skirmunt, D.Y. Pashentsev, R.V. Tishkin**

We propose a high-speed algorithm for image segmentation sky. The main steps of segmentation, as well as comparative results in terms of performance with respect to imaging the sky.