

УДК 004.94

Исследование возможности использования технологической камеры спутника в качестве датчика Земли

Морин Никита Павлович

mornik507@mail.ru

Тененбаум Степан Михайлович

tenenbaum@bmstu.ru

SPIN-код: 2883-2447

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. Исследована возможность применения штатной технологической камеры малых КА, предназначенной для визуального контроля раскрытия СБ, в качестве датчика Земли. Представлен алгоритм обработки ЧБ-изображений малого разрешения: нормализация гистограммы, подавление шума, выделение границы «Земля — космос» оператором градиента, отбор контуров по геометрическим признакам и аппроксимация дуги горизонта окружностью. По оцененному центру земного диска определяется направление на надир и формируется грубая ориентационная оценка, пригодная для поддерживающих контуров управления. Показано, что при наличии частичных перекрытий кадра элементами конструкции и вариациях освещенности метод сохраняет устойчивость за счет последовательного отсева ложных контуров и проверки согласованности модели окружности. Полученные результаты указывают на потенциал снижения стоимости навигационных систем НКА за счет повторного использования технологической камеры без доработки аппаратуры.

Ключевые слова: технологическая камера, датчик Земли, алгоритм, обработка изображений, преобразование Хафа, аппроксимация контуров, надир

Investigation into the use of a satellite engineering camera as an earth sensor

Morin Nikita Pavlovich

mornik507@mail.ru

Tenenbaum Stepan Mikhailovich

tenenbaum@bmstu.ru

SPIN-code: 2883-2447

BMSTU, Moscow, Russia

Abstract. A standard onboard engineering camera, originally intended for monitoring solar array deployment, is considered for use as an Earth sensor. An image-processing algorithm was developed that performs Earth-limb extraction, horizon-arc approximation, and estimation of the image-plane coordinates of the Earth disk center. The study shows that the engineering camera can provide coarse estimation of the satellite's nadir direction, enabling potential reductions in the cost of spacecraft navigation systems.

Keywords: engineering camera, Earth sensor, algorithm, image processing, Hough transform, contour approximation, nadir

Введение. Точное определение ориентации спутника относительно Земли является важной задачей для навигации и корректировки орбиты космических аппаратов. Традиционно для этой цели используются специализированные и дорогостоящие датчики Земли. Однако, как показывает опыт, многие спутники уже оборудованы камерами, предназначенными для других задач, например для мониторинга раскрытия солнечных панелей. Такие камеры могут быть использованы для выполнения дополнительной функции — определения ориентации спутника относительно Земли, что значительно снизит стоимость и сложность космических систем.

Целью данной работы является исследование возможности использования технологической камеры спутника для грубой оценки положения надир и ориентации спутника относительно Земного диска. В частности, исследована методика обработки изображений, полученных с такой камеры для выделения Земного контура и определения координат центра Земли.

Методика обработки изображений опирается на методы, описанные в работах таких авторов, как Гонсалес и Вудс, которые подробно описывают цифровую обработку изображений, включая гауссово размытие и выделение контуров [1]. Кроме того, использование преобразования Хафа для аппроксимации окружностей подробно рассмотрено в работе Дуды и Харта [2], а также в исследованиях по применению компьютерного зрения для космических миссий [3].

Материалы и методы. Исходные данные для обработки — это полутонные изображения Земной поверхности, полученные с технологической камеры спутника. Для их анализа был разработан следующий алгоритм:

– предобработка изображений: для уменьшения шума и улучшения качества изображения применяется гауссово размытие (9). Этот метод эффективно снижает высокочастотные колебания, сохраняя основные контуры:

$$I_{blurred} = G_{\sigma} I_{original}, \quad (9)$$

где G_{σ} — гауссов фильтр с параметром σ ; а $I_{original}$ — исходное изображение. Этот подход используется для улучшения качества изображений, как описано в работе [1];

– выделение контуров: с помощью метода Кэнни (Canny) детектируются границы между Землей и космосом. Алгоритм включает в себя расчет градиента изображения **Ошибка! Источник ссылки не найден.** с использованием оператора Собеля и последующую фильтрацию контуров:

$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2}, \quad (2)$$

где G_x и G_y — компоненты, полученные через операторы Собеля. Метод Кэнни используется для локализации резких переходов интенсивности, что позволяет точно выделить контуры Земли, как описано в работах Гонсалеса и Вудса [1];

– морфологическая обработка: после выделения контуров методом Кэнни для устранения мелких разрывов и улучшения целостности контуров применяется операция морфологического замыкания (morphological closing) (10):

$$I_{closed} = (I_{edges} \oplus K) \ominus K, \quad (10)$$

где $\oplus$, $\ominus$ — дилатация и эрозия; K — эллиптический структурирующий элемент. Данный метод эффективно устраняет шумы и разрывы на изображении, как описано в работах о морфологической обработке изображений [3].

– аппроксимация контуров: на следующем этапе производится аппроксимация Земного контура для определения его формы. В данном случае используется метод преобразования Хафа для обнаружения окружности, которая наилучшим образом описывает Земной диск. Окружность задается уравнением (11):

$$(x - a)^2 + (y - b)^2 = r^2, \quad (11)$$

где (a, b) — центр; r — радиус. С помощью преобразования Хафа определяется наиболее вероятная окружность на изображении, соответствующая Земному диску, как это описано в исследовании Дуды и Харта [2];

– определение параметров окружности: применение преобразования Хафа позволяет точно определить параметры окружности: центр и радиус. Для дальнейшего анализа используется метод выделения точек контуров, соответствующих наибольшим пикселям в аккумуляторном пространстве преобразования Хафа, что позволяет точно оценить центр Земного диска и его радиус, как это показано в работах по компьютерному зрению для космических приложений [3].

Результаты. Процесс обработки изображений позволил успешно выделить контур Земли и аппроксимировать его в виде окружности. Ниже представлены результаты для одного из изображений: исходное изображение (рис. 1); гауссово размытие (рис. 2); детекция границ методом Кэнни (рис. 3); результат морфологической обработки (рис. 4); аппроксимация окружности и нахождение центра Земли (рис. 5).

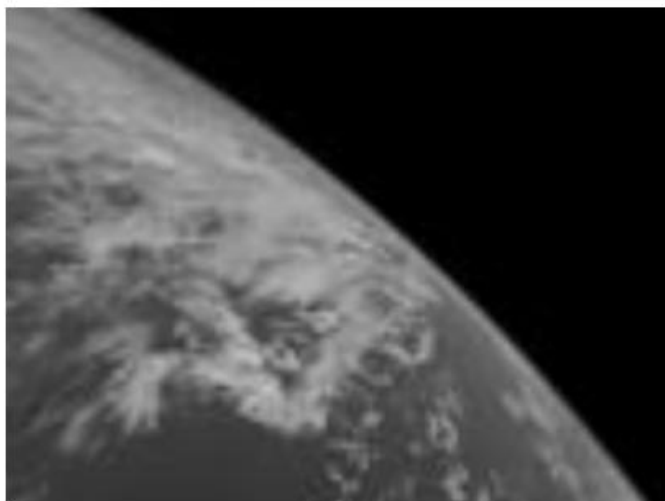


Рис. 1. Исходное изображение

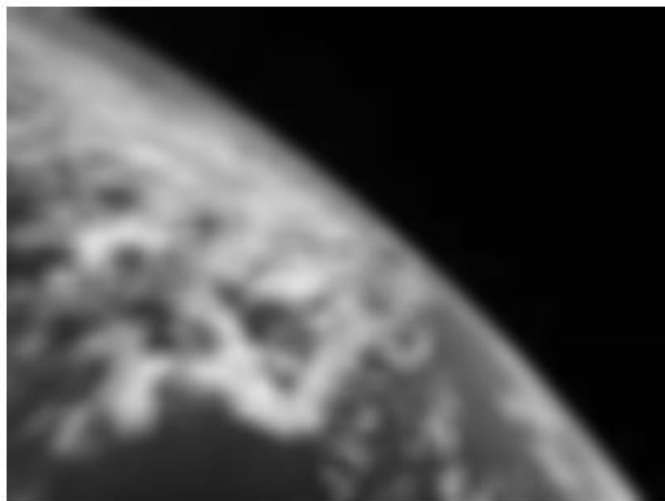


Рис. 2. Гауссово размытие



Рис. 3. Детекция границ



Рис. 4. Морфологическая обработка

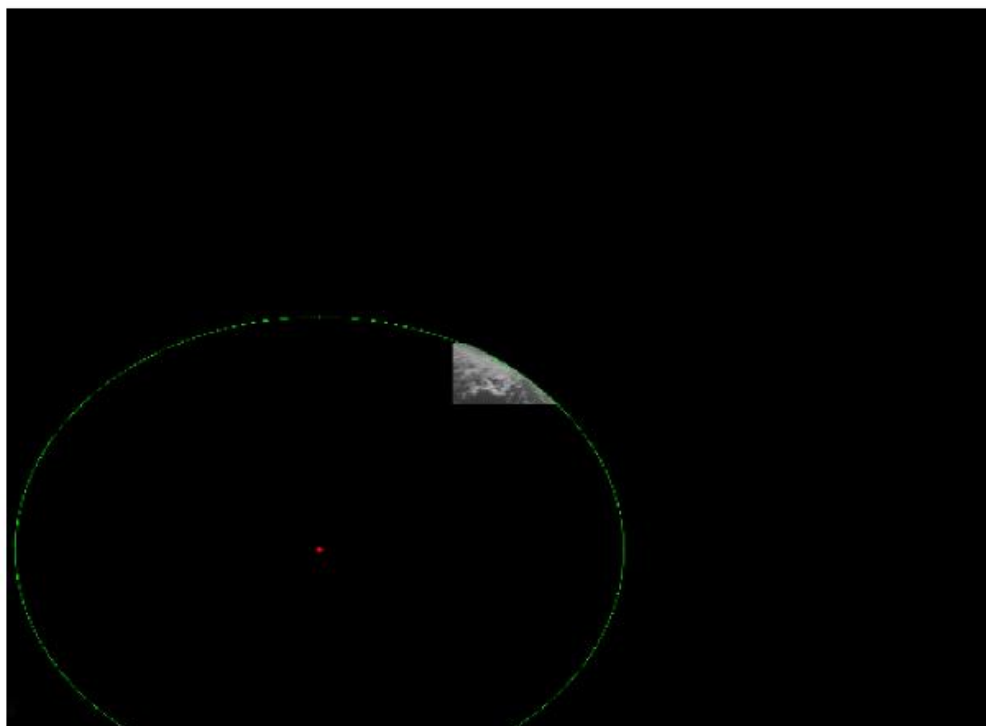


Рис. 5. Центр Земли

После обработки изображения мы получили координаты центра Земли (356,828) пикселей и радиус 356 пикселей, что соответствует грубому определению положения надира спутника.

Обсуждение полученных результатов. Результаты исследования показывают, что использование технологической камеры спутника для грубой оценки положения надира возможно. Несмотря на низкий контраст изображений и наличие шумов, предложенная методика позволяет относительно точно определять центральную точку Земного диска. Это открывает возможности для использования технологических камер в качестве альтернативы дорогостоящим специализированным датчикам Земли, особенно в малых космических аппаратах.

Однако стоит отметить, что для повышения точности необходимо учитывать такие аспекты, как эллиптичность Земного диска и возможные искажения изображения из-за наклона спутника. Перспективы дальнейших исследований включают совершенствование алгоритма с учетом этих факторов, а также интеграцию данных с другими датчиками.

Заключение. Представлен подход к использованию технологической камеры как простого датчика Земли с оценкой направления на надир по дуге горизонта. Алгоритм ориентирован на низкое разрешение и неполный обзор, что соответствует ограничениям малых КА. Достигнутая точность достаточна для грубой ориентации и резервирования штатных средств навигации. Основные ограничения связаны с сильными бликами, почти полным отсутствием горизонта и крупными перекрытиями конструкцией. Дальнейшая работа включает автоматическую калибровку камеры на орбите, учет радиометриче-

ских особенностей и интеграцию оценки надирного направления в контур АОС.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Гонсалес Р., Вудс Р. *Цифровая обработка изображений*. Москва, Техносфера, 2011, 1072 с.
- [2] Duda R.O., Hart P.E. Use of the Hough transformation to detect lines and curves in pictures. *Communications of the ACM*, 1972, vol. 15, no. 1, pp. 11–15. <https://doi.org/10.1145/361237.361242>
- [3] Braun B., Barf J. Image processing based horizon sensor for estimating the orientation of sounding rockets, launch vehicles and spacecraft. *CEAS Space Journal*, 2023, vol. 15, pp. 795–820. <https://doi.org/10.1007/s12567-022-00461-0>
- [4] Jain A.K. *Fundamentals of Digital Image Processing*. Englewood Cliffs, Prentice-Hall, 1989, 572 p.
- [5] Canny J. A Computational Approach to Edge Detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1986, vol. 8, no. 6, pp. 679–698. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.1986.4767851>