

ПОСТРОИТЕЛЬ МЕСТНОЙ ВЕРТИКАЛИ ДЛЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА НАНОКЛАССА

И. А. ЛОМАКА, Е. В. УСТЮГОВ

*Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королева,
(национальный исследовательский университет)
448086, Самара, Россия,
E-mail: efim163@gmail.com*

Рассмотрено устройство для построения местной вертикали для космического аппарата нанокласса, основанное на визировании горизонта Земли в видимом диапазоне длин волн. Применение такой системы на наноспутнике позволит определять направление на местную вертикаль с точностью, сравнимой с точностью инфракрасных построителей местной вертикали, при этом со значительным выигрышем в массе и энергопотреблении. К недостаткам системы относятся невозможность определить ориентацию на теневом участке орбиты, а также засветка изображения при попадании солнечного света в кадр. Результаты численного эксперимента показали, что предложенная система работает в широком диапазоне углов ориентации. Рассмотрен полунатурный эксперимент по определению угла тангажа с помощью обработки видеоизображений, поступающих с камеры. Эксперимент показал, что точность системы построения местной вертикали космического аппарата на основе обработки видеоизображений сопоставима с точностью инфракрасных построителей местной вертикали.

Ключевые слова: наноспутник, построитель местной вертикали, видеонавигация, датчик, эксперимент

В космической технике широко применяются оптические построители местной вертикали (ПМВ), работа которых основана на „визировании“ видимого горизонта планеты как минимум в трех его различных точках. Автоматические ПМВ используют наличие теплового контраста между поверхностью планеты и „холодным“ космическим пространством, а поэтому они получили название инфракрасных ПМВ или ИК-вертикалей (ИКВ) [1].

Такие ПМВ используются на тяжелых КА с достаточным энергетическим обеспечением. Если рассматривать малые космические аппараты (МКА), в частности наноспутники, то применение в них инфракрасной камеры и тем более вращающегося зеркала нерационально, так как энергетика такого спутника ограничена. На наноспутниках целесообразно использовать легкую оптическую систему с низким энергопотреблением, не имеющую подвижных частей, например, систему построения местной вертикали по анализу изображения Земли — видео-вертикаль.

Следует заметить, что для работы обычных построителей вертикали используется ИК-диапазон электромагнитных волн, на отдельных участках которого происходит заметное поглощение и излучение атмосферных газов, в частности паров воды. При этом ИКВ обнаруживает перепад яркости между различными слоями атмосферы, т.е. для построения местной вертикали используется не изображение края Земли, а линия контраста между слоями атмосферы [2].

Предлагаемая в настоящей работе система лишена этого недостатка, так как визирует горизонт в видимой части спектра. Переход в видимый диапазон, для которого существуют матричные приемники излучения большого размера, позволяет значительно упростить и удешевить аппаратуру, а также одновременно проводить навигационные измерения по гори-

зонту и по ориентирам на поверхности Земли [3]. Это особенно актуально для наноспутников, создаваемых в основном из коммерческих компонентов [4, 5].

Подобная схема построения местной вертикали в среде Matlab приведена на рис. 1. Предлагаемый построитель местной вертикали выделяет границы [6] горизонта и определяет реперные точки. Для определения отклонения продольной оси космического аппарата нанокласса от местной вертикали по изображению на фотоприемной матрице выделяется линия горизонта Земли с помощью детектора границ Канны [7]. Затем на полученном изображении определяются радиус кривизны и центр дуги, являющейся линией горизонта Земли. Вектор, соединяющий крайние точки дуги, перпендикулярен плоскости, проходящей через центр Земли и центр масс наноспутника. Аналогичные вычисления производятся и для последующего изображения, полученного с помощью второй камеры. Векторное произведение двух полученных векторов дает вектор направления на центр Земли в связанной с наноспутником системе координат.

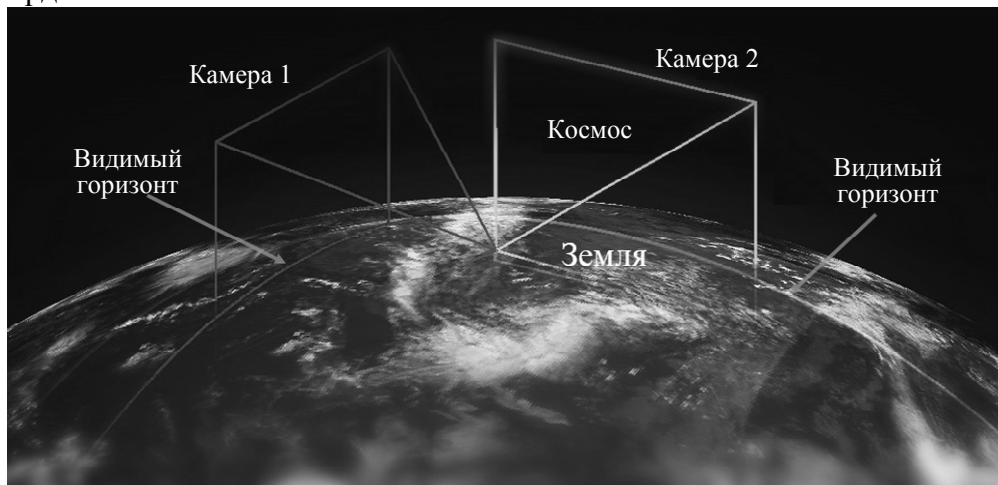


Рис. 1

Рассмотрим математическую постановку задачи. Наноспутник находится на высоте H над поверхностью Земли в точке с координатами $(0, 0, R + H)$. Принимается допущение, что Земля представляет собой сферу, описываемую уравнением:

$$x^2 + y^2 + z^2 = R^2.$$

На наноспутнике расположены два одинаковых фотоприемника, которые получают одновременно два фотокадра горизонта Земли. Оси визирования фотоприемников описываются единичными векторами \mathbf{n}_{1k} и \mathbf{n}_{2k} (в геоцентрической системе координат) соответственно. Фотокадры имеют разрешение $m \times n$ пикселей.

Проекция горизонта Земли на плоскость фотоприемника представляет собой дугу окружности, описываемой параметрической системой уравнений:

$$\left. \begin{aligned} x &= x_0 + \frac{R}{\sqrt{a^2 + c^2}} \left(c \cos t - \frac{ab \sin t}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \right), \\ y &= y_0 + \frac{R\sqrt{a^2 + c^2}}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \sin t, \\ z &= z_0 - \frac{R}{\sqrt{a^2 + c^2}} \left(c \cos t + \frac{bc \sin t}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \right), \end{aligned} \right\}$$

где $t \in [0; 2\pi)$; a, b, c — компоненты вектора оси визирования.

Угол раствора конуса обзора фотоприемников α известен. Необходимо определить вектор местной вертикали \mathbf{n} в связанной системе координат, а также найти отклонение продольной оси от местной вертикали.

Для решения этой задачи предлагается система (рис. 2), состоящая из фотоприемников канала тангажа 1, фотоприемников канала рыскания 2 и бортового вычислительного устройства. Фотоприемники расположены таким образом, что их оси визирования 3 перпендикулярны между собой и лежат в одной плоскости, ортогональной продольной оси наноспутника 4.

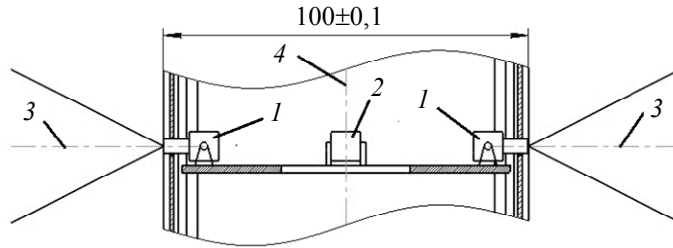


Рис. 2

Для верификации видеовертикали по расчетной модели была построена область применимости, были оценены ошибки δ системы в этой области (рис. 3, ψ — угол рыскания, θ — угол тангажа).

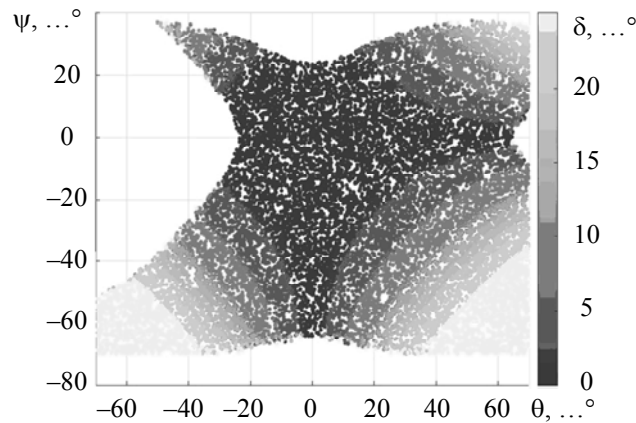


Рис. 3

Для апробации алгоритма был проведен полунатурный эксперимент с целью определения ориентации по углу тангажа с помощью установки, приведенной на рис. 4.

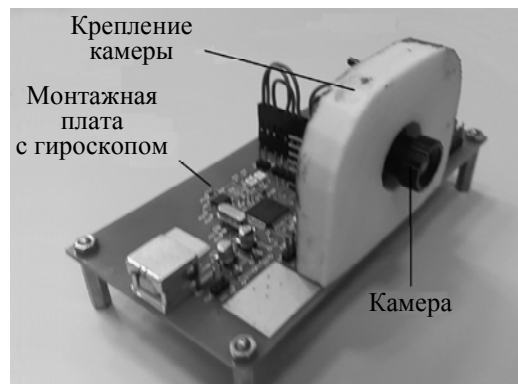


Рис. 4

Перед камерой располагалось тестовое изображение горизонта Земли. Экспериментальная установка отклонялась на некоторый угол θ , который вычислялся по показаниям акселеро-

метра, одновременно с этим производилась видеозапись. Экспериментальные данные представлены на рис. 5 и 6.

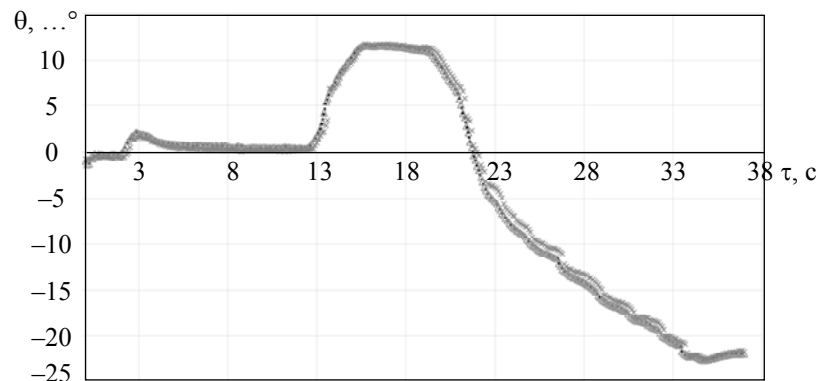


Рис. 5

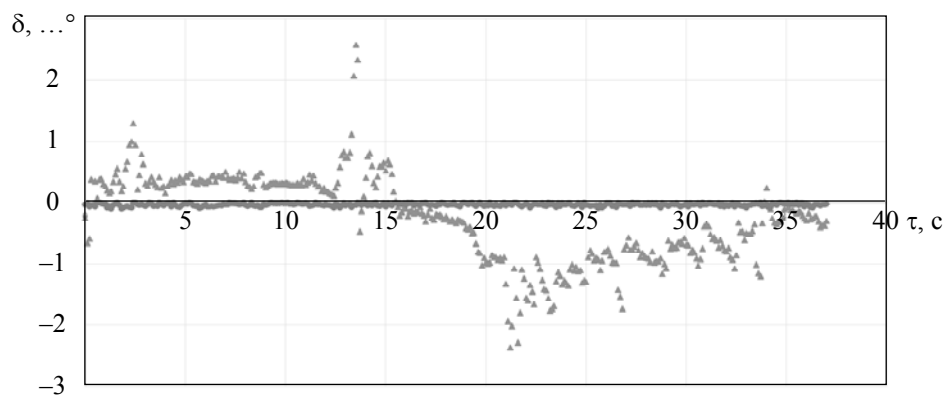


Рис. 6

Среднеквадратическое отклонение видеовертикали составило $0,752^\circ$, среднеквадратическое отклонение модели $0,038^\circ$. Разница между модельными и экспериментальными значениями объясняется наличием шума на фотокадрах, а также несовершенностью экспериментальной установки. Эксперимент показал, что система построения местной вертикали космического аппарата на основе обработки видеоизображений имеет точность, сопоставимую с точностью инфракрасных построителей местной вертикали [8].

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, в рамках проектной части госзадания (проект № 9.1421.2014/К).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волков В. Г., Ковалев А. В., Федчишин В. Г. Тепловизионные приборы нового поколения // Специальная техника. 2001. № 6. С. 16—21; 2002. № 1. С. 18—24.
2. Гришин В. А. Задача создания построителей местной вертикали высокой точности и навигационных систем на основе визирования линии горизонта // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 3. С. 108—114.
3. Жуков Б. С., Жуков С. Б., Фориш А. А. Возможности навигационных измерений по лимбу Земли в видимом и ближнем ИК диапазоне // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12, № 2. С. 61—76.
4. Kirillin A., Belokonov I., Timbai I., Kramlikh A., Melnik M., Ustiugov E., Egorov A., Shafran S. SSAU Nanosatellite Project for the Navigation and Control Technologies Demonstration // Procedia Engineering. 3rd IAA-RACTs Conf. on Scientific and Technological Experiments on Automatic Space Vehicles and Small Satellites, SPEXP 2014. 2015. Vol. 104. P. 97—106.

5. *Shakhmatov E., Belokonov I., Timbai I., Ustyugov E., Nikitin A., Shafran S.* SSAU Project of the Nanosatellite SamSat-QB50 for Monitoring the Earth's Thermosphere Parameters // *Procedia Engineering*. 3rd IAA-RACs Conf. on Scientific and Technological Experiments on Automatic Space Vehicles and Small Satellites, SPEXP 2014. 2015. Vol. 104. P. 139—146.
6. *Belokonov I. V., Ustyugov E. V.* Utilization of video navigation for attitude determination of soyuz rocketupper stage after payload separation // *Proc. of the Intern. Astronautical Congress*. 2014. P. 4533—4535.
7. *Canny J.* A Computational approach to edge detection // *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 1986. Vol. 6, N 8. P. 679—698.
8. *Jain Y. K., Kamalakar J. A.* GEO earth sensor for LEO applications // *J. of Spacecraft Technology*. 1996. Vol. 1, N 6. P. 53—59.

Сведения об авторах

Игорь Андреевич Ломака

— магистрант; СГАУ, межвузовская кафедра космических исследований; E-mail: igorlomaka63@gmail.com

Ефим Владимирович Устюгов

— СГАУ, межвузовская кафедра космических исследований; ассистент; E-mail: efim163@gmail.com

Рекомендована межвузовской
кафедрой космических исследований

Поступила в редакцию
14.11.2015 г.

Ссылка для цитирования: *Ломака И. А., Устюгов Е. В.* Построитель местной вертикали для космического аппарата нанокласса // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2016. Т. 59, № 6. С. 466—470.

DEVICE FOR CONSTRUCTING THE LOCAL VERTICAL FOR NANOSPACECRAFT

I. A. Lomaka, E. V. Ustyugov

*Samara State Aerospace University, 448086, Samara, Russia,
E-mail: efim163@gmail.com*

A device and a method for constructing local vertical for nanospacecraft based on the sight of the horizon of the Earth in the visible wavelength range are proposed. The use of such a system on the nanosatellite is reported to allow determination of the local vertical direction with accuracy comparable with the accuracy of infrared local vertical detectors, and also to provide significant gains in mass and power consumption. The disadvantages of the system include the inability to determine the orientation on the shady part of the orbit, as well as flashing of the image when struck by sunlight in the frame. Presented results of numerical experiments demonstrate that the proposed system works in a wide range of orientation angles. A semi-natural experiment to determine the pitch angle by processing video images received from camera is carried out. Results of the experiment confirm that the accuracy of the developed system for constructing local vertical of spacecraft based on video processing is comparable to the precision provided by infrared detectors of local vertical.

Keywords: nanosatellite, local vertical constructing, video navigation, sensor, experiment

Data on authors

Igor A. Lomaka — Undergraduate Student; SSAU, Department of Space Exploration;
E-mail: igorlomaka63@gmail.com

Efim V. Ustyugov — SSAU, Department of Space Exploration; Assistant;
E-mail: efim163@gmail.com

For citation: *Lomaka I. A., Ustyugov E. V.* Device for constructing the local vertical for nanospacecraft // *Izv. vuzov. Priborostroenie*. 2016. Vol. 59, N 6. P. 466—470 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2016-59-6-466-470