

## Определение направления на местную вертикаль для наноспутника класса CubeSat по анализу изображений Земли

© И.А. Ломака, Е.В. Устюгов

СНИУ им. академика С.П. Королёва, Самара, 443086, Россия

*Рассмотрено применение видеоизображений для определения местной вертикали наноспутника. Разработаны алгоритмы решения поставленных задач. Представлены основные формулы, результат численного эксперимента. Приведены выводы об области применения систем.*

**Ключевые слова:** наноспутник, местная вертикаль, видеонавигация, модель движения, ориентация.

**Введение.** Видеонавигацию начали применять с конца 1960-х годов. Наибольшее распространение получили оптические построители местной вертикали (ПМВ), работа которых основана на «визировании» видимого горизонта планеты как минимум в трех его различных точках при наличии теплового контраста между поверхностью планеты и «холодным» космическим пространством. Поэтому их также называют инфракрасными (ИК) ПМВ или ИК-вертикалями (ИКВ) [1].

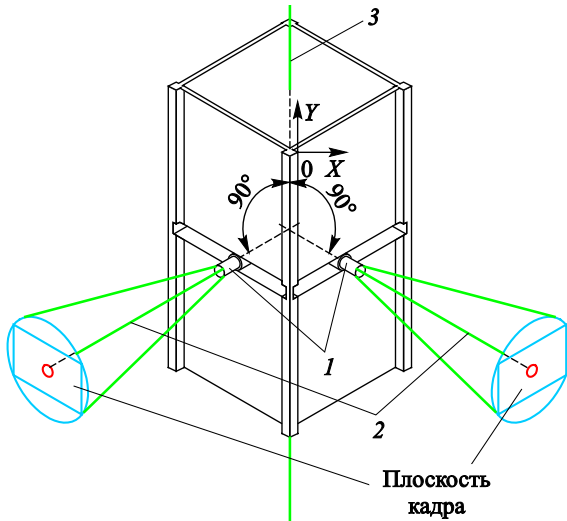
Возможны различные варианты реализации просмотра ИК-горизонта планеты. В основном просмотр осуществляется путем кругового сканирования края горизонта планеты угловым полем построителя. При работе такой ИКВ ее оптическая ось за счет вращения зеркала с некоторой угловой скоростью описывает коническую поверхность, ось которой совпадает с осью космического аппарата (КА). Тем самым обеспечивается круговой просмотр ИК-горизонта планеты, а воспринимаемое прибором излучение содержит информацию об отклонении ориентируемой оси КА от направления МВ.

Такие ПМВ используются на тяжелых КА с достаточной энергетикой. Если рассматривать малые космические аппараты (МКА), в частности наноспутник, то применение в нем ИК-камеры и тем более вращающего зеркала не рационально, так как энергетика такого спутника чрезвычайно ограничена. При вращении зеркала создается возмущающий момент, который будет вращать МКА. Масса и габариты такой системы достаточно велики.

Если легкая оптическая система с малыми габаритами и энергопотреблением, не имеющая подвижных частей, сможет обеспечить определение ориентации МКА с заданной точностью и в широком диапазоне начальных углов ориентации, угловых скоростей и высот,

то ее можно использовать как основную систему определения угловой ориентации МКА.

**Определение направления на МВ по анализу изображений Земли.** Для определения направления на МВ предлагается использовать изображения (рис. 1) с двух видеокамер 1, расположенных на гранях наноспутника так, что их оси визирования 2 взаимно перпендикулярны.



**Рис. 1.** Схема расположения видеокамер:

1 — видеокамеры; 2 — ось визирования; 3 — продольная ось

Для определения отклонения продольной оси наноспутника от МВ на изображении, полученном с видеокамеры, с помощью детектора границ Канны выделяют линию горизонта Земли [2]. Крайние точки дуги являются точками начала и конца вектора (рис. 2), перпендикулярного к плоскости, проходящей через центр Земли и центр масс наноспутника. Аналогичные построения проводятся и на изображении, полученном от второй видеокамеры. Векторное произведение двух векторов дает вектор направления на центр Земли в связанной с наноспутником системе координат.

**Определение области применимости системы.** Решим следующую задачу. Имея видеокамеру, жестко закрепленную на КА с известными характеристиками, и зная ее ориентацию и положение относительно Земли, определить видимость горизонта Земли. Пусть видеокамера находится в точке  $A$  с координатами  $(0, 0, R + H)$ , как показано на рис. 3, где  $H$  — высота над поверхностью Земли,  $R$  — радиус Земли. Вектор оси визирования видеокамеры  $\vec{n}_k$  имеет координаты  $(n_{kx}, n_{ky}, n_{kz})$ . Угол полураствора видеокамеры  $\alpha$ , соотношение сторон кадра  $3/4$ . Поле обзора видеокамеры в пространстве представля-

ет собой пирамиду, грани которой проходят через точку  $A$  и определяются векторами  $\vec{n}_1, \vec{n}_2, \vec{n}_3, \vec{n}_4$ . Основание пирамиды определяется плоскостью, проходящей через точку  $K$  касания сферы вектором  $\vec{n}_p$ .

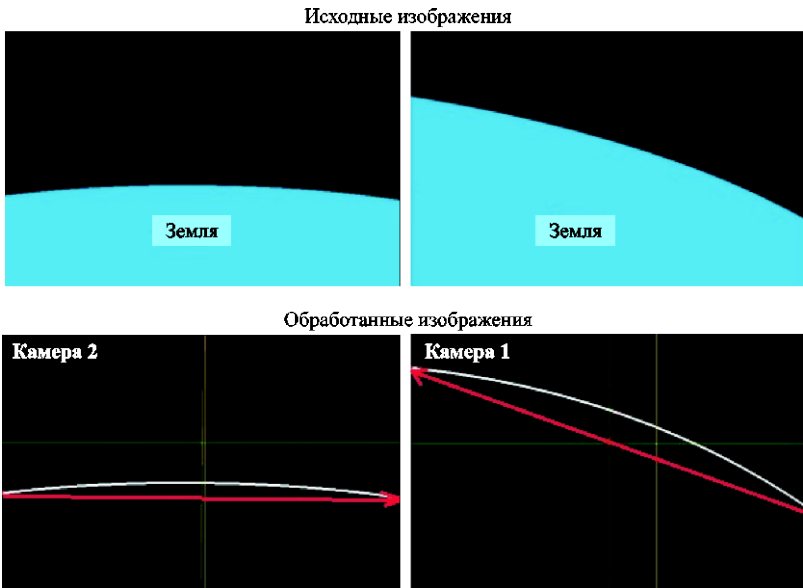


Рис. 2. Результаты обработки и анализа изображений

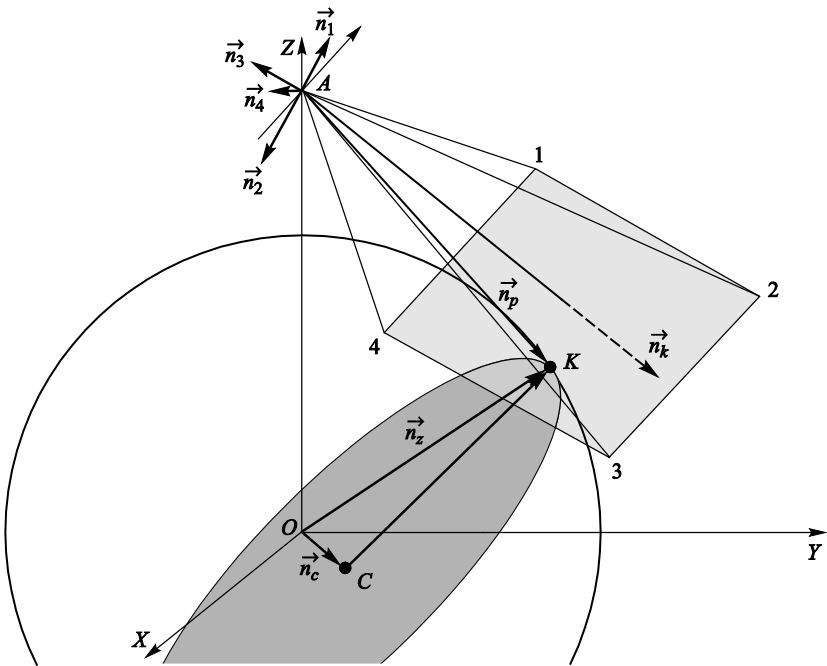


Рис. 3. Положение видеокамеры в пространстве

Координаты точки касания  $K$  определим, решив систему линейных уравнений

$$\begin{aligned} v_x K_x + v_y K_y + v_z K_z &= 0; \\ n_{z_x} K_x + n_{z_y} K_y + n_{z_z} K_z &= (R + H) n_{z_z}; \\ n_{k_x} K_x + n_{k_y} K_y + n_{k_z} K_z &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\vec{v} = \vec{n}_z \times \vec{n}_p$ .

Сечение сферы плоскостью кадра 1–2–3–4 представляет собой окружность с центром в точке  $C$ , координаты которого определим из решения системы линейных уравнений:

$$\begin{aligned} v_x C_x + v_y C_y + v_z C_z &= 0; \\ n_{r_x} C_x + n_{r_y} C_y + n_{r_z} C_z &= 0; \\ n_{k_x} C_x + n_{k_y} C_y + n_{k_z} C_z &= n_{k_x} K_x + n_{k_y} K_y + n_{k_z} K_z. \end{aligned} \quad (2)$$

Вычислим координаты крайних точек кадра 1–4 соответственно решением систем линейных уравнений:

$$\begin{aligned} n_{1_x} X_1 + n_{1_y} Y_1 + n_{1_z} Z_1 &= n_{1_z} (R + H); \\ n_{3_x} X_1 + n_{3_y} Y_1 + n_{3_z} Z_1 &= n_{3_z} (R + H); \\ n_{k_x} X_1 + n_{k_y} Y_1 + n_{k_z} Z_1 &= n_{k_x} C_x + n_{k_y} C_y + n_{k_z} C_z; \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} n_{1_x} X_2 + n_{1_y} Y_2 + n_{1_z} Z_2 &= n_{1_z} (R + H); \\ n_{4_x} X_2 + n_{4_y} Y_2 + n_{4_z} Z_2 &= n_{4_z} (R + H); \\ n_{k_x} X_2 + n_{k_y} Y_2 + n_{k_z} Z_2 &= n_{k_x} C_x + n_{k_y} C_y + n_{k_z} C_z; \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} n_{2_x} X_3 + n_{2_y} Y_3 + n_{2_z} Z_3 &= n_{2_z} (R + H); \\ n_{4_x} X_3 + n_{4_y} Y_3 + n_{4_z} Z_3 &= n_{4_z} (R + H); \\ n_{k_x} X_3 + n_{k_y} Y_3 + n_{k_z} Z_3 &= n_{k_x} C_x + n_{k_y} C_y + n_{k_z} C_z; \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} n_{2_x} X_4 + n_{2_y} Y_4 + n_{2_z} Z_4 &= n_{2_z} (R + H); \\ n_{3_x} X_4 + n_{3_y} Y_4 + n_{3_z} Z_4 &= n_{3_z} (R + H); \\ n_{k_x} X_4 + n_{k_y} Y_4 + n_{k_z} Z_4 &= n_{k_x} C_x + n_{k_y} C_y + n_{k_z} C_z. \end{aligned} \quad (6)$$

Определим радиус сечения сферы плоскостью кадра по формуле

$$R_{\text{сеч}} = \sqrt{(K_x - C_x)^2 + (K_y - C_y)^2 + (K_z - C_z)^2}. \quad (7)$$

Зададим окружность в пространстве, зная ее радиус и координаты центра согласно системе уравнений

$$\begin{aligned}
 X_o &= C_x + \frac{R_{\text{сеч}}}{\sqrt{n_{kx}^2 + n_{kz}^2}} \left( n_{kz} \cos t - \frac{n_{kx} n_{ky} \sin(t)}{\sqrt{n_{kx}^2 + n_{ky}^2 + n_{kz}^2}} \right); \\
 Y_o &= C_y + \frac{R_{\text{сеч}} \sqrt{n_{kx}^2 + n_{kz}^2}}{\sqrt{n_{kx}^2 + n_{ky}^2 + n_{kz}^2}} \sin t; \\
 Z_o &= C_z - \frac{R_{\text{сеч}}}{\sqrt{n_{kx}^2 + n_{kz}^2}} \left( n_{kx} \cos t + \frac{n_{kz} n_{ky} \sin(t)}{\sqrt{n_{kx}^2 + n_{ky}^2 + n_{kz}^2}} \right),
 \end{aligned} \tag{8}$$

где  $t \in [0; 2\pi]$ .

Зная координаты точек окружности и координаты крайних точек кадра, определим принадлежность точек окружности прямоугольнику кадра. Если точка попадает в кадр, то это означает, что камера ее видит. Определим попадание произвольной точки окружности  $T$  с координатами  $(T_x, T_y, T_z)$  в прямоугольник с вершинами 1–4 (координаты вершин известны). Построим векторы из точки  $T$  в вершины прямоугольника. Точка  $T$  будет принадлежать прямоугольнику, если сумма площадей треугольников  $T12$ ,  $T23$ ,  $T34$  и  $T41$  равна площади прямоугольника 1234 (рис. 4).

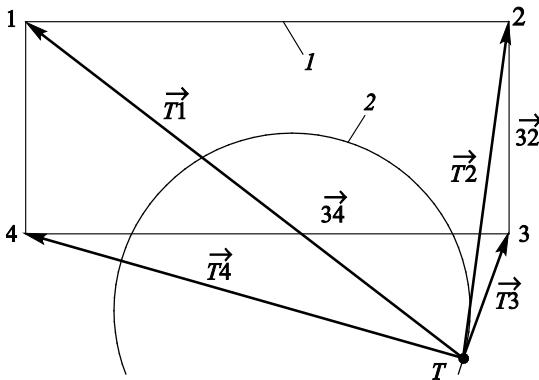


Рис. 4. К определению принадлежности точки  $T$  прямоугольнику кадра:  
 1 — граница кадра; 2 — дуга горизонта

Площади треугольников определим по следующим формулам:

$$S_{T12} = 0,5 |\vec{T1} \times \vec{T2}|; \tag{9}$$

$$S_{T23} = 0,5 |\vec{T2} \times \vec{T3}|; \tag{10}$$

$$S_{T_{34}} = 0,5 \left| \overline{T3} \times \overline{T4} \right|; \quad (11)$$

$$S_{T_{41}} = 0,5 \left| \overline{T4} \times \overline{T1} \right|, \quad (12)$$

площадь прямоугольника по формуле

$$S_{1234} = \left| \overline{32} \times \overline{34} \right|. \quad (13)$$

Таким образом исследуем все точки окружности на принадлежность кадру.

После умножения векторов  $\vec{n}_1, \vec{n}_2, \vec{n}_3, \vec{n}_4, \vec{n}_k, \vec{n}_p, \vec{n}_z, \vec{n}_c$  на матрицу поворота и проверки всех точек сечения на принадлежность кадру можно сделать вывод о видимости горизонта, а значит, и о принципиальной возможности решить задачу навигации при данной ориентации. Результаты моделирования приведены на рис. 5.

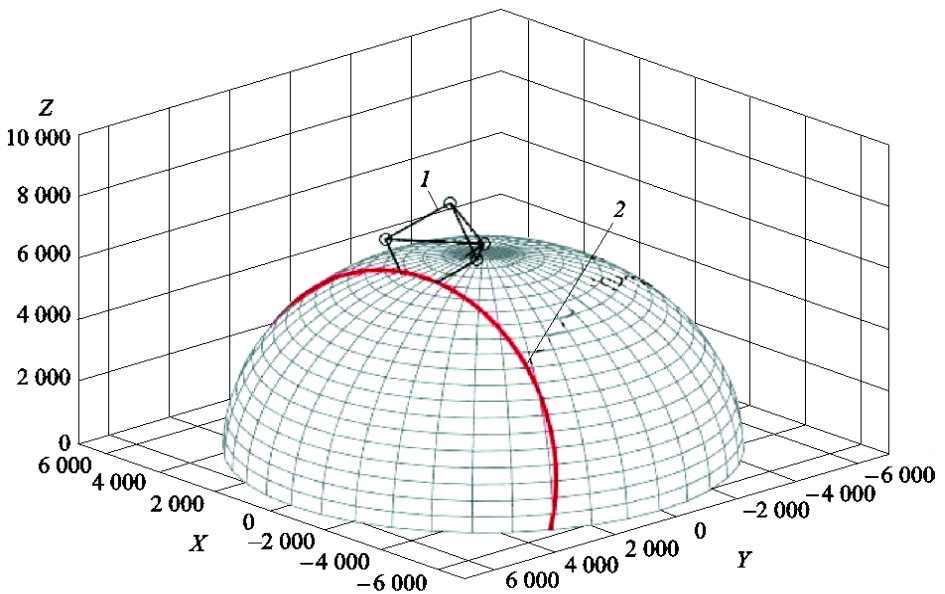


Рис. 5. Результат моделирования

По модели численно была определена область применимости видеокамеры с углом полураствора  $\alpha = 28^\circ$ , находящейся на высоте 300 км (рис. 6).

Две зоны максимума обусловлены тем, что горизонт Земли проходит по диагонали кадра.

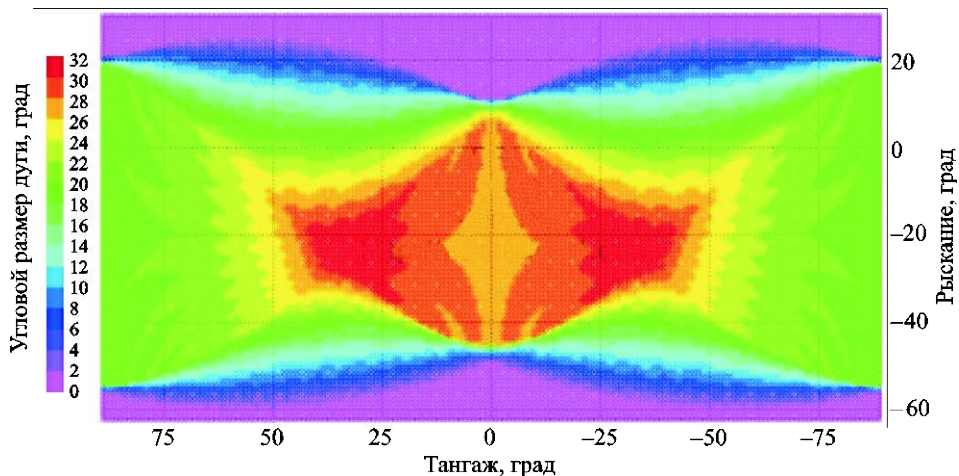


Рис. 6. Область применимости системы

**Заключение.** Для двух видеокамер область видимости представлена пересечением двух подобных областей, одна из которых изображена на рис. 6, а вторая повернута на  $90^\circ$  по часовой стрелке относительно начала координат. Таким образом, алгоритм имеет широкую область применения, его можно использовать для определения ориентации наноспутника.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Волков В.Г., Ковалев А.В., Федчишин В.Г. Тепловизионные приборы нового поколения. *Специальная техника*, 2001, № 6, с. 16–21.
- [2] Волков В.Г., Ковалев А.В., Федчишин В.Г. Тепловизионные приборы нового поколения. *Специальная техника*, 2002, № 1, с. 18–24, 26.
- [3] *Canny edge detector*. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Canny\\_edge\\_detector](https://en.wikipedia.org/wiki/Canny_edge_detector) (дата обращения 20.01.2016).

Статья поступила в редакцию 30.05.2016

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Ломака И.А., Устюгов Е.В. Определение направления на местную вертикаль для наноспутника класса CubeSat по анализу изображений Земли. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2016, вып. 8.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2016-08-1520>

*Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на XL Академических чтениях по космонавтике, посвященных памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых — пионеров освоения космического пространства, Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 26–29 января 2016 г.*

**Ломака Игорь Андреевич** родился в 1993 г. Лаборант, магистрант кафедры «Космические исследования» им. академика С.П. Королёва. e-mail: igorlomaka63@gmail.com

**Устюгов Ефим Владимирович** родился в 1989 г., окончил СНИУ им. академика С.П. Королёва в 2012 г. Аспирант, ассистент кафедры «Космических исследований» СНИУ им. академика С.П. Королева. Автор более 10 научных работ в области видеонавигации и проектирования наноспутников. e-mail: efim163@gmail.com



## **Determining the local vertical line direction for CubeSat class nano-satellite by the Earth images analysis**

© I.A. Lomaka, E.V. Ustyugov

Samara State University, 443086, Russia

*The study deals with applying video images to determine the local vertical line of a nano-satellite. In the research we develop algorithms for solving the task and present the basic formula, the result of numerical experiment. Finally, we make the conclusions concerning the systems application.*

**Keywords:** *nano-satellite, the local vertical, videonavigation, motion model, orientation.*

### REFERENCES

- [1] Volkov V.G., Kovalev A.V., Fedchishin V.G. *Spetsialnaya tekhnika — Special machinery*, 2001, no. 6, pp. 16–21.
- [2] Volkov V.G., Kovalev A.V., Fedchishin V.G. *Spetsialnaya tekhnika — Special machinery*, 2002, no. 1, pp. 18–24, 26.
- [3] *Canny edge detector*. Available at: [https://en.wikipedia.org/wiki/Canny\\_edge\\_detector](https://en.wikipedia.org/wiki/Canny_edge_detector) (accessed January 20, 2016).

**Lomaka I.A.** (b. 1993), Master degree student of the Department of Space Research, Samara State University. e-mail: igorlomaka63@gmail.com

**Ustyugov E.V.** (b. 1989), post-graduate student, assistant of the Department of Space Research, Samara University. Author of over 10 scientific papers in the field of video-navigation and nano-satellite design. e-mail: efim163@gmail.com