

# Использование данных навигационных приборов с целью получения и координатной привязки видеоданных дистанционного зондирования Земли высокого разрешения

А.В. Никитин

*Институт космических исследований РАН  
117997 Москва, ул. Профсоюзная, 84/32  
E-mail: [andyunik935@yandex.ru](mailto:andyunik935@yandex.ru)*

Приведены основные технические характеристики приборов солнечной и звездной ориентации. Определено назначение приборов астроориентации и спутниковой системы навигации при получении и координатной привязке видеоданных съемочной системой дистанционного зондирования Земли. Предложена методика координатной привязки изображений, полученных камерой на ПЗС линейках при проведении стереосъемки объекта земной поверхности. Определены фотограмметрические зависимости между координатами соответственных точек на сканерных изображениях объекта и его геоцентрическими координатами на поверхности Земли.

Сформулирован перечень определяемых параметров при калибровке камеры и космического аппарата для обеспечения среднеквадратической ошибки координатной привязки сопоставимой с уровнем разрешения камеры.

**Ключевые слова:** сканерное изображение, ПЗС линейка, прибор звездной ориентации, прибор солнечной ориентации, стереосъемка, матрица ориентации камеры в инерциальной системе координат, матрица ориентации прибора звездной ориентации в инерциальной системе координат, координаты центра съемки, звездное время, спутниковая система навигации.

## Введение

В ОФО ИКИ РАН разрабатываются и изготавливаются приборы угловой ориентации КА – солнечные и звездные датчики, которые успешно эксплуатируются на КА различного назначения. В последнее время для КА Метеор-М изготовлена и поставлена заказчику съемочная камера МСУ-100 и МСУ-50.

Для координатной привязки видеоданных дистанционного зондирования высокого разрешения необходимо получить информацию о пространственном положении съемочной камеры и об углах ее наклона.

Звездный датчик предназначен для определения матрицы перехода от системы координат прибора к системе координат звездного каталога, приведенную на текущую эпоху. Он обеспечивает определение углов наклона аппарата относительно второй экваториальной системы координат.

Система спутниковой навигации позволяет определять геоцентрические координаты КА в момент съемки.

При отсутствии системы спутниковой навигации возможно использование моментов съемки вместе с орбитальными данными, полученными в результате наземных наблюдений за КА. Расчет позволяет определить искомые геоцентрические координаты КА.

Солнечный датчик позволяет определять направление на Солнце в системе координат КА. При помощи солнечного датчика можно выполнить ориентирование КА перед съемкой по Солнцу для выставки требуемых условий освещенности снимаемой поверхности при

значительных угловых скоростях, когда использование звездного датчика не представляется возможным или при значительных удалениях от Земли.

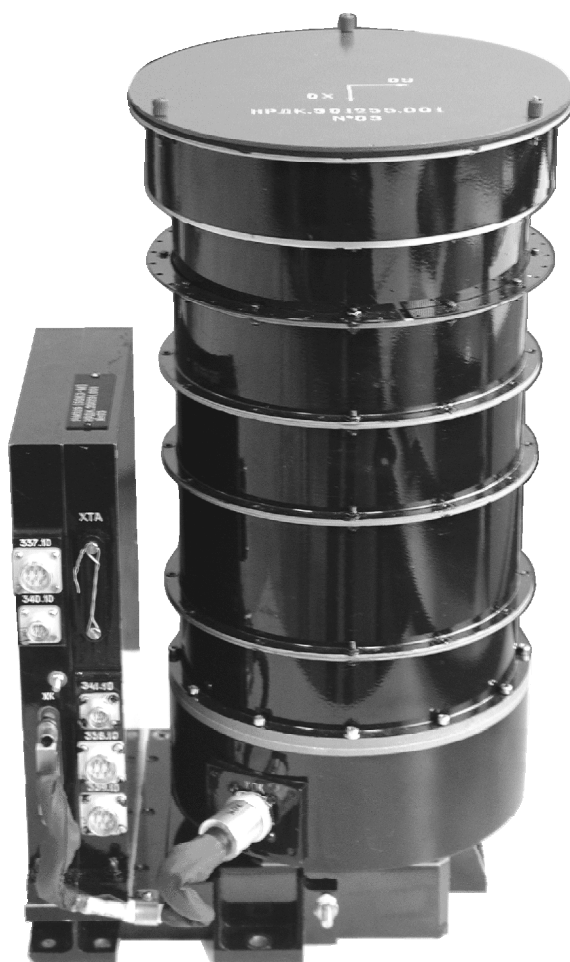
### **Основные характеристики и назначение прибора звездной ориентации БОКЗ-М**

Прибор звездной ориентации БОКЗ-М (см. рис. 1) позволяет определять параметры матрицы (кватерниона) перехода от приборной системы координат, определяемой посадочным местом прибора ко второй экваториальной системе координат (инерциальной).

Данные прибора звездной ориентации могут быть использованы для:

- наведения съемочной (целевой) аппаратуры в заданную область инерциального пространства;
- координатно-временной привязки видеoinформации в комплексе с прибором спутниковой навигации (ГЛОНАСС, GPS);
- управления движением КА в режиме реального времени;
- астрокоррекции гироскопических приборов на борту КА.

Прибор обладает характеристиками, приведенными в Таблице 1.



*Рис. 1. Прибор звездной ориентации БОКЗ-М*

Таблица 1. Основные характеристики БОКЗ-М, подтвержденные в ходе наземных испытаний и в полете

Наименование	Значение
Масса, кг	3,9
Габариты, мм	310 x 230 x 235
Фокусное расстояние, мм	60
Энергопотребление, Вт	15
Частота обновления информации, Гц	0,3
Точность определения направления на звезды ( $3\sigma$ ), угл. сек	2
Среднеквадратическая ошибка определения углов поворота вокруг осей X, Y	
на околоземной орбите, угл. сек.	1.8
на геостационарной орбите, угл.сек.	1.5
Среднеквадратическая ошибка определения угла поворота вокруг оси Z	
на околоземной орбите, угл.сек.	14
на геостационарной орбите, угл.сек.	12
Угол допустимой засветки к Солнцу, °	25
Максимальная угловая скорость движения КА, °/с	0.15
Апостериорная вероятность определения ориентации за 6 лет полета не менее	0.995

### Основные характеристики и назначение прибора солнечной ориентации Оптический солнечный датчик

Оптический солнечный датчик позволяет определить направляющие косинусы орта Солнца в приборной системе координат, связанной с посадочным местом прибора в угле поля зрения  $120 \times 60$  градусов. В качестве оптического элемента прибора используется маска с 9-ю диафрагмами.

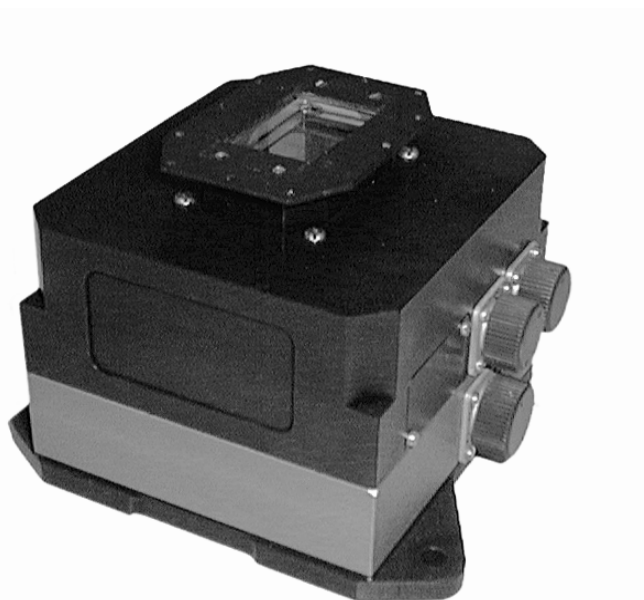


Рис. 2. Оптический солнечный датчик (ОСД)

Таблица 2. Технические характеристики ОСД, подтвержденные в ходе наземных испытаний и в полете

Наименование	Значение
Угол поля зрения, °	120x60
Точность $\sigma$ , угл.мин	1
Масса, кг	0.7 кг
Допустимая угловая скорость, °/с	2
Частота, Гц	4

Данные прибора солнечной ориентации могут быть использованы для:

- ориентирования солнечных панелей КА на Солнце и поддержание Солнечной ориентации;
- ориентирования КА с целью получения требуемого направления на Солнце в системе координат КА при съемке.

### Сtereo обработка изображений, полученных съемочной камерой, состоящей из 9-ти ПЗС линеек

Рассмотрим в качестве примера использования навигационных приборов для координатной привязки камеру, состоящую из девяти ПЗС линеек и объектива, расположенных в соответствии согласно рис. 3 и предназначенную для аэрокосмической съемки объектов земной поверхности.

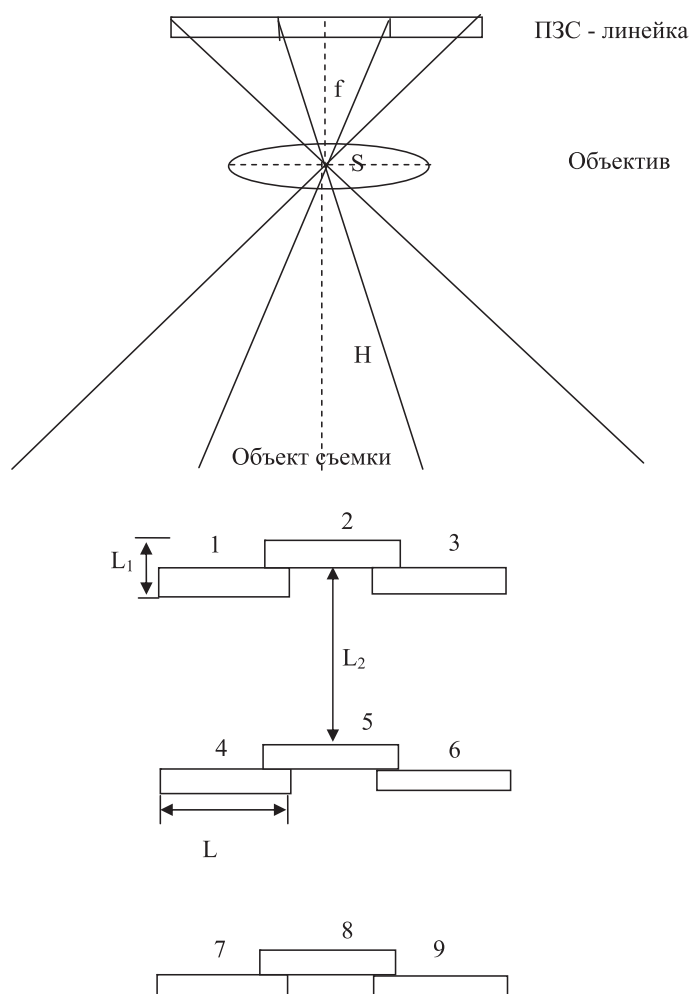
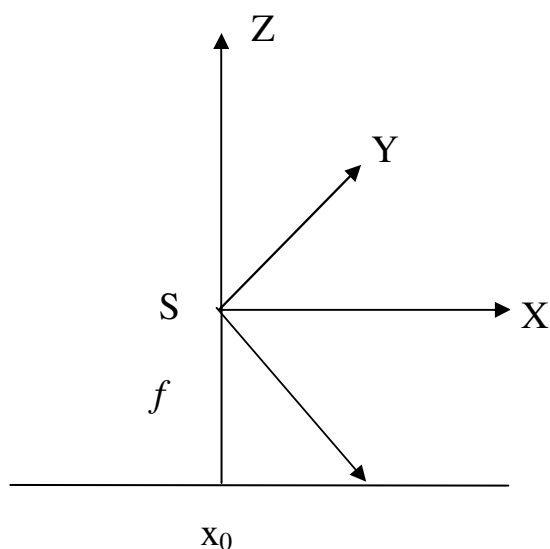


Рис. 3. Расположение линеек в камере

$L_1$  – размер между линейками определяется двойным размером корпуса ПЗС линейки. Дополнительные 2 линейки к средней позволяют увеличить угол обзора камеры. Так при длине одной ПЗС линейки 56 мм и фокусном расстоянии 100мм, угол обзора с  $30^\circ$  увеличиться до  $80^\circ$ . С высоты 600 км такая камера охватывает полосу обзора 1000 км при разрешении 42 м.

$L_2$  – расстояние от крайней до центральной линейки, определяется углом стереозасечки. Для объектива с фокусным расстоянием 100мм и угла стереозасечки 30 градусов, расстояние  $L_2$  будет равным 13,3 мм.

***Внутренняя система координат каждой ПЗС линейки камеры***



*Рис. 4. Внутренняя система координат ПЗС линейки*

На рисунке 4 показано:

S – задняя узловая точка объектива,

Ось X – параллельна оси ПЗС линейки,

Ось Z – направлена по нормали к ПЗС линейке и проходит через заднюю узловую точку объектива,

Ось Y – дополняет систему до правой,

$f$  – фокусное расстояние линейки,

$x_0$  – координата главной точки,

радиус-вектор на изображение объекта съемки во внутренней системе координат

$$r = \begin{pmatrix} x - x_0 \\ 0 \\ -f \end{pmatrix}; \quad x = (i - \frac{L}{2}) \cdot pS; \quad (1)$$

где

$L$  – длина ПЗС линейки в мм,

$i$  – номер элемента ПЗС линейки, содержащий изображение объекта съемки,

$pS$  – размер элемента ПЗС линейки в мм.

Все внутренние системы координат линеек ( $BCK_i$ ) могут быть связаны с приборной системой координат (ПСК) камеры по результатам ее геометрической калибровки при помощи матриц перехода.

### Сканерное изображение объекта съемки

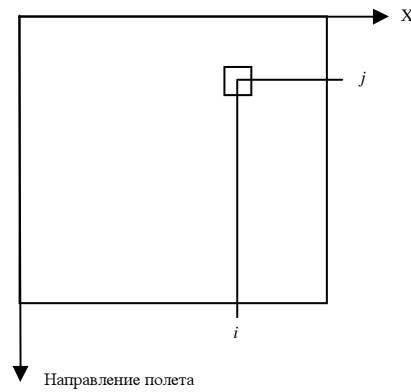


Рис. 5. Схема сканерного изображения

Сканерный снимок представляет собой набор строк и столбцов прямоугольной матрицы, в каждый элемент которой содержится значение квантованной яркости изображаемого объекта.

$j$  – номер ПЗС линейки по направлению полета, пересекающий изображение объекта съемки;  
 $i$  – номер элемента ПЗС линейки, содержащий изображение объекта съемки.

$$t = t_0 + \frac{j}{f_{cmp}}; \quad (2)$$

$$x = i \cdot pS - x_0. \quad (3)$$

$f_{cmp}$  – строчная частота (10кГц)

$pS$  – размер элемента разрешения

$t$  – время прохождения линейки над объектом съемки.

### Построение стереоизображений съёмочной камерой

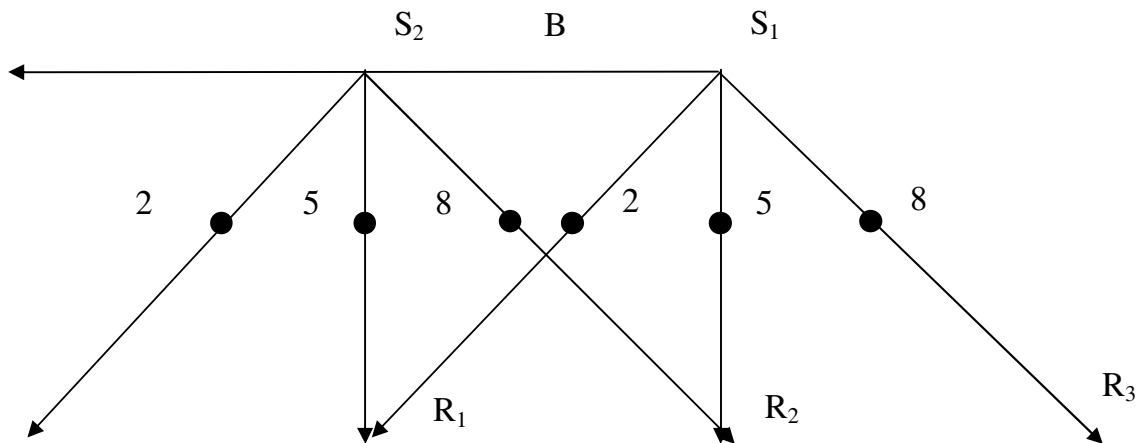


Рис. 6. Схема расположения линеек при стереосъемке земной поверхности

Для получения стереопары для рассматриваемой камеры, нужно получить сканерные изображения с 1-4, 4-7; 2-5, 5-8; 3-6 и 6-9 линеек (см. рис.6).

Для получения стереопары сканерных изображений с камерами на одной линейке, необходимо выполнять съемку земной поверхности с наклоном одной камеры на угол 15 градусов. Также возможно использовать две камеры с углом между оптическими осями в 30°.

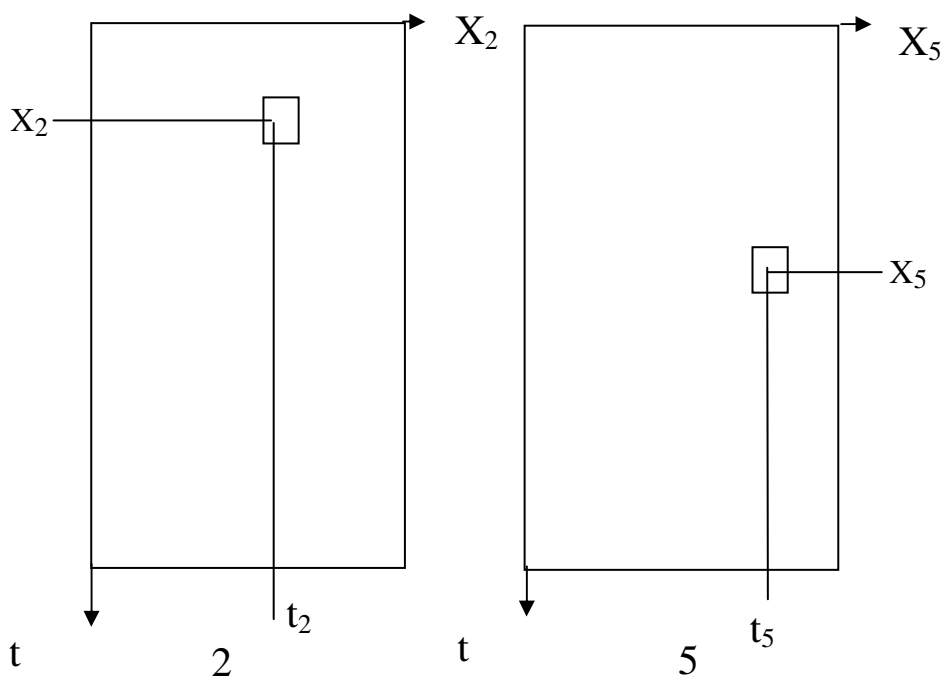
При выбранном угле стереозасечки в 30 градусов точность определения высоты объекта будет в 2 раза ниже разрешения в плоскости изображения.

Для камер с разрешением 1 м при съемке с линейной скоростью в 7 км/с, необходимо работать с временами накопления меньшими 0,14 мс, чтобы возникающий смаз изображения не превышал разрешения на местности (1 м). При недостаточной яркости изображения на указанном времени накопления, необходимо устранять смаз за счет углового вращения носителя, которое может контролироваться при помощи датчиков звездной ориентации. так для съемки с разрешением 1 м, временем накопления 10 мс, угловая скорость компенсации смаза составит 40 угл.мин./с с высоты 600 км.

Условия освещенности при съемке могут быть выбраны с помощью разворота аппарата под заданным углом к Солнцу, Данные по развороту определяются с помощью измерений солнечных датчиков.

### *Поиск соответственных точек на сканерных изображениях*

Проводится на выбранных парах сканерных изображений (см. рис. 7).



*Рис. 7. Измерение сканерных изображений*

Измерение соответственных точек на сканерных изображениях может проводиться по следующему алгоритму (см. рис. 7):

- Выбор контурных точек на изображении 2
- Поиск координат максимума корреляционной функции вокруг предполагаемой зоны поиска на изображении 5
- Фиксация координат соответственных точек  $x_2$ ,  $t_2$  и  $x_5$ ,  $t_5$ .

### *Аппроксимация движения носителя*

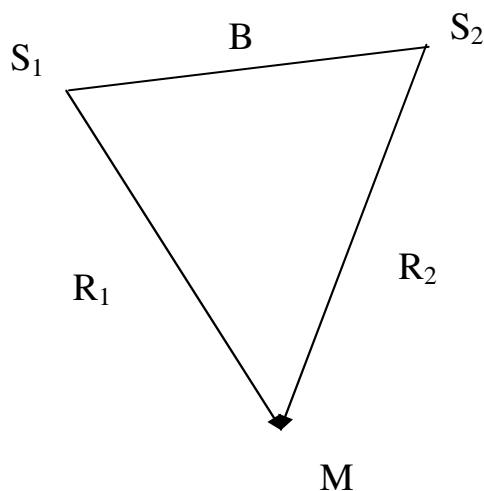
Далее необходимо аппроксимировать пространственное перемещение носителя между центрами экспонирования соседних пар изображений, а также изменение углов ориентации приборной системы координат относительно геоцентрической системы координат сглаживающей функцией. При аппроксимации нужно использовать данные прибора звездной ориентации и системы спутниковой навигации.

Для сглаживающей функции линейного вида запишем следующие соотношения:

$$\begin{aligned} X_s &= X_{s0} + V_x \cdot t & \alpha &= \alpha_0 + \omega_\alpha \cdot t \\ Y_s &= Y_{s0} + V_y \cdot t & \omega &= \omega_0 + \omega_\omega \cdot t; \\ Z_s &= Z_{s0} + V_z \cdot t & \kappa &= \kappa_0 + \kappa_\alpha \cdot t \end{aligned} \quad (4)$$

При недостаточной точности линейной аппроксимации движения после анализа навигационных данных по минимуму остаточных рассогласований определяется необходимая степень аппроксимирующего полинома сглаживающей функции. Также дополнительно к прямолинейному движению могут быть использованы начальные параметры разложения функций изменения элементов внешнего ориентирования каждой линейки, что повышает точность разложения.

### *Получение 3-х мерных координат объекта съемки*



*Рис. 8. Набор векторов, необходимый для получения объекта съемки*

Для получения 3-х мерных координат объекта съемки М по изображению, необходимо определить 3 вектора: В, R<sub>1</sub> и R<sub>2</sub>.

$$B = \begin{pmatrix} X_{s1} - X_{s2} \\ Y_{s1} - Y_{s2} \\ Z_{s1} - Z_{s2} \end{pmatrix}; \quad (5)$$

$$R_1 = A_5 \cdot r_5; \quad R_2 = A_2 \cdot r_2 \quad (6)$$

В – базис съемки определяется по данным системы спутниковой навика



$A_5$  – матрица направляющих косинусов осей ВСК 5-й линейки в геоцентрической системе координат спутниковой системы навигации вычисляется по значениям сглаживающих функций угловых элементов ориентирования на момент времени  $t_2$ .

$A_2$  – матрица направляющих косинусов осей ВСК 2-й линейки в системе координат спутниковой системы навигации вычисляется по значениям сглаживающих функций угловых элементов ориентирования на момент времени  $t_2$ .

Для вычисления матрицы  $A_i$  нужно использовать:

- матрицу ориентации приборной системы звездного датчика относительно второй экваториальной системы координат (измерения звездного датчика).
- истинное звездное время (дата + время съемки).
- матрицу перехода от ПСК БОКЗ-М к ПСК съёмочной системы (результаты калибровки КА).
- матрицу ориентации  $i$ -й линейки относительно приборной системы координат съёмочной системы (результаты калибровки съёмочной системы).

$$r_5 = \begin{pmatrix} x_5 - x_{05} \\ 0 \\ -f_5 \end{pmatrix}; \quad r_2 = \begin{pmatrix} x_2 - x_{02} \\ 0 \\ -f_2 \end{pmatrix} \quad (7)$$

$r_5$  и  $r_2$  – радиус-векторы на объект съемки во внутренней системе координат 5-й и 2-й линейки.

Координаты точки М могут быть вычислены по следующим формулам на основании вычисления точки пересечения 2-х прямых, проходящих параллельно проектирующим лучам  $R_1$  и  $R_2$ .

$$Z = \frac{B_x - \frac{B_z \cdot R_{x2}}{R_{z2}}}{\frac{R_{x1}}{R_{z1}} - \frac{R_{x2}}{R_{z2}}}; \quad X = Z \cdot \frac{R_{x1}}{R_{z1}}; \quad Y = Z \cdot \frac{R_{y1}}{R_{z1}} \quad (8)$$

Если выполнить определение пространственных координат по формулам (8) для каждой точки снимаемого объекта, отобразившегося на изображениях центральной и крайней линейки то задачу о его координатной привязке можно считать решенной.

Для практической реализации данного способа координатной привязки необходимо выполнить калибровку съёмочной системы, по результатам которой определить матрицу ориентации внутренних систем координат каждой из линеек относительно приборной системы координат, также их фокусные расстояния и координаты главных точек ( $f_i$ ,  $x_i$ ) и при необходимости коэффициентов дисторсии.

Уточнение параметров функций движения может быть выполнено по опорным точкам исходя из решения системы уравнений неявных функций вида (8) для каждой, опознанной опорной точки по паре сканерных изображений.

### Заключение

В работе рассмотрена возможность использования данных приборов БОКЗ-М, ОСД и системы спутниковой навигации при проведении аэрокосмических съемок съёмочных систем на основе ПЗС линеек и для координатной привязки их сканерных изображений.

Также определен набор необходимых параметров, которые должны быть определены в результате калибровки камер и при калибровке летательного аппарата.

# Utilize navigation data for obtaining and coordinate reference high resolution remote sensing images

A.V. Nikitin

*Space Research Institute of RAS*

*E-mail: [andvnik935@yandex.ru](mailto:andvnik935@yandex.ru)*

The technical characteristics of the Star Trackers and Sun Sensor are given. The designation of the Star Tracker and Satellite Navigation System with obtaining and coordinate reference of videodata is determined by the surveying system of the remote sensing of the Earth. It is proposed the procedure of the coordinate reference of the images, obtained by camera on CCD lines with conducting of stereo surveying of the object on the earth surface. Photogrammetric dependences between the coordinates of corresponding points on the scanning images of object and its geocentric coordinates on the earth surface are determined. The enumeration of the determined parameters with the calibration of camera and automatic spacecraft for achieving the mean-square error of the coordinate reference of camera images comparable with resolution level is formulated.

**Keywords:** Scanning image, CCD line, Star Tracker, Sun Sensor, Stereo Surveing, Attitude camera matrix in inertial coordinate system, Attitude matrix of the Star Tracker in inertial coordinate system, Coordinates of the surveying center, star time, Satellite Navigation System.