

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОРИЕНТАЦИИ ОРБИТАЛЬНОГО ТЕЛЕСКОПА НА ОСНОВЕ ОБРАБОТКИ БОРТОВОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ

В.И. Заварзин¹, А.В. Ли¹, Е.М. Ломоносов²

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация
e-mail: alvik87@gmail.com

²ОАО “Красногорский завод имени С.А. Зверева”,
г. Красногорск, Московская обл., Российская Федерация
e-mail: e.lomonosov@zenit-kmz.ru

Качество информации, получаемой системами дистанционного зондирования Земли, существенно зависит от точности определения угловой ориентации орбитального телескопа, основными измерительными инструментами при этом являются звездные датчики. Для высокоточной координатной привязки космических снимков требуется прецизионное определение взаимной ориентации систем координат, связанных с оптико-электронной аппаратурой и звездными датчиками. Предложен алгоритм обработки бортовой информации, разработанный в целях компенсации ошибок установки и температурной нестабильности и позволяющий получать равномерную по трем осям ориентацию телескопа и проводить последующую калибровку, заключающуюся в вычислении уточненных значений взаимного положения звездных датчиков на аппаратуре, которая будет поддерживать значения ошибок на минимально возможном уровне. Учет навигационных и эксплуатационных данных в процессе съемки позволяет повысить точность привязки объектов съемки на местности.

Ключевые слова: звездные датчики, оптико-электронная аппаратура, космический аппарат, ориентация, системы координат.

DEFINITION OF ORBITAL TELESCOPE ORIENTATION ON THE BASIS OF ON-BOARD MEASURING DATA PROCESSING

V.I. Zavarzin¹, A.V. Li¹, E.M. Lomonosov²

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation
e-mail: alvik87@gmail.com

²S.A. Zverev Krasnogorsky Zavod, Krasnogorsk, Moscow region,
Russian Federation
e-mail: e.lomonosov@zenit-kmz.ru

Quality of the information received by the systems of the Earth remote sensing depends sufficiently on the evaluation precision of the orbital telescope angular attitude. Stellar sensors are at that principal measuring instruments. Precise definition of mutual orientation of the coordinate systems connected with optoelectronic devices and stellar sensors is needed for highly accurate gridding of space photographs. On-board information processing algorithm elaborated to compensate alignment errors and temperature instability, is proposed. It allows to obtain uniformly in three axes precise orientation of the telescope, as well as to carry out subsequent calibration consisting in calculation of adjusted values of the stellar sensors mutual orientation on the apparatus that would support the error values on a minimal possible level. Navigation and operational data have to be taken into account in order to increase accuracy of binding the object to the earth location.

Keywords: stellar sensors, optoelectronic devices, space vehicle, orientation, coordinate system.

Системы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) используются для картографирования земной поверхности, мониторинга состояния лесов и рек, поиска полезных ископаемых и т.п., при этом требуются высококачественные фотоснимки, главным достоинством которых должна быть точная привязка ключевых точек к наземным координатам. Для получения качественного результата требуется точное ориентирование направления камеры аппаратуры ДЗЗ [1]. Ориентация визирной оси аппаратуры ДЗЗ в пространстве требует высокоточных навигационных измерений, выполняемых полностью автономными средствами, установленными на борту космического аппарата. Традиционно такими средствами являются звездные датчики (ЗД), измерения которых позволяют определить угловые параметры ориентации и навигации. Звездные датчики, использующие принцип ориентации по группе звезд, позволяют стабильно вычислять углы трехосной ориентации приборной системы координат относительно инерциальной системы координат (ИСК). Однако любой, даже самый высокоточный ЗД со среднеквадратической погрешностью не более $1 \dots 3$ угл. с. поперек оси визирования ($\sigma_{X,Y}$), обладает недостатком, что вокруг оси визирования погрешность σ_Z составляет ~ 20 угл. с. ввиду малой базы измерений [2]. Сравнительные характеристики нескольких моделей современных отечественных и зарубежных ЗД приведены в таблице.

Точность геометрической модели съемки определяется точным учетом навигационных данных вместе с геометрической моделью снимка, что позволит получить точность привязки на Земле до десятков и, возможно, единиц метров. Поэтому для получения высокоточной привязки снимков ДЗЗ и автономной коррекции положения космического аппарата требуется использовать несколько ЗД, измерения которых следует подвергать математической обработке.

Такие вычисления требуют точного знания взаимного расположения ЗД. При установке ЗД на аппаратуру измеряется взаимное расположение базовых поверхностей ЗД и их положение относительно приборной системы координат (ПСК), материализованной базовой кубпризмой с помощью высокоточных измерительных приборов, полученные данные используются в алгоритме вычисления уточняющих поправок взаимного расположения ЗД.

Для решения поставленной задачи необходимо использовать не менее двух ЗД, сориентированных таким образом, что их визирные оси взаимно перпендикулярны. Это оптимальное расположение датчиков, позволяющее вычислить равноточную трехосную ориентацию (рис. 1) [3].

Связь системы координат ЗД с ИСК. В системе координат ЗД ось $Z_{ЗД}$ параллельна оси визирования, оси $X_{ЗД}$ и $Y_{ЗД}$ лежат в плос-

Характеристики звездных датчиков

Название	Погрешность определения ориентации, σ_{xy}/σ_z , угл. с	Угловое поле, угл. град.	Частота обновления информации, Гц	Масса, кг	Габаритные размеры, мм
БОКЗ-М60/1000, ИКИ РАН (РФ)	1,3 / 7,5	16×16	4	4,8	432×240×217
БОКЗ-МФ01, ИКИ РАН (РФ)	3/15	16×16	4	2	248×180×171
Астрол-17, НПО “Лептон” (РФ)	2/10	20×15	22	0,5	125×81×79
348К, НПП “Геофизика-Космос” (РФ)	1,6/-	20×20	6	1,16	∅132×210
Astro-APS, Jena Optronik (Германия)	1,5/15	20×20	30	2	120×120×228
Hydra, Sodern (Франция)	3/25	22,6×22,6	16	1,6	∅142×283
СТ-602 Ball Aerospace (США)	3/-	8×8	10	5,4	∅178×250

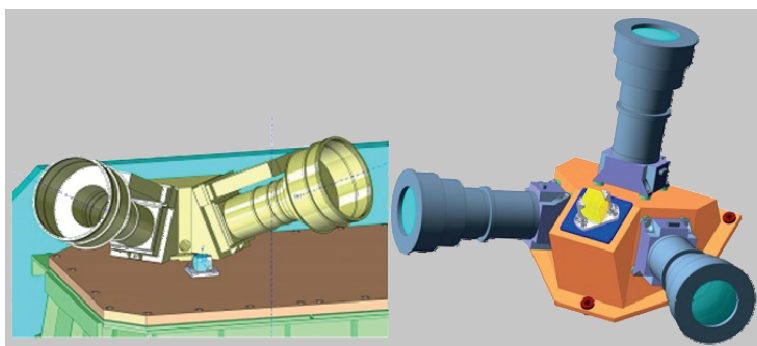


Рис. 1. Схемы расположения ЗД на корпусе оптико-электронной аппаратуры

кости фотоприемного устройства и образуют правую ортогональную систему координат (рис. 2).

Современные ЗД определяют ориентацию собственной системы координат в инерциальном пространстве (рис. 3) сравнением угловых расстояний конфигурации полученных изображений звезд с угловыми

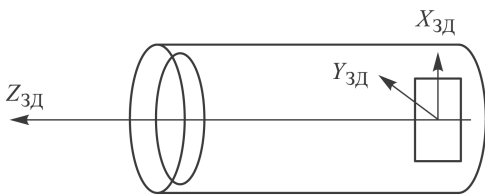


Рис. 2. Система координат ЗД

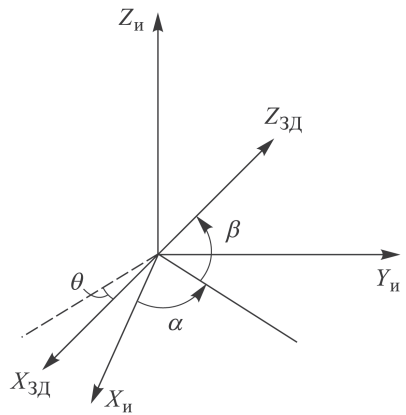


Рис. 3. Инерциальная система координат ЗД

расстояниями между звездами бортового каталога (хранится в памяти ЗД). При этом с высокой точностью вычисляются угловые координаты α , β визирной оси ЗД (ось $Z_{ЗД}$), вектора ориентации на группу звезд наблюдаемых ЗД и θ — угла разворота системы координат вокруг $Z_{ЗД}$, значение этого угла вычисляется с меньшей точностью и требует уточнения [4]. Выходная информация от ЗД может выдаваться в виде матрицы направляющих косинусов ориентации системы координат ЗД относительно ИСК привязанного к середине времени экспонирования ПЗС-матрицы:

$$M_{ЗД \rightarrow ИСК} = \begin{bmatrix} \sin \alpha \cos \theta + \cos \alpha \sin \beta \sin \theta & -\cos \alpha \cos \theta + \sin \alpha \sin \beta \sin \theta & -\cos \beta \sin \theta \\ -\sin \alpha \sin \theta + \cos \alpha \sin \beta \cos \theta & \sin \alpha \sin \beta \cos \theta + \cos \alpha \sin \theta & -\cos \beta \cos \theta \\ \cos \alpha \cos \beta & \cos \beta \sin \alpha & \sin \beta \end{bmatrix}. \quad (1)$$

В условиях космического полета при измерениях угловых координат большую роль играет сохранность угловой взаимной ориентации ЗД между собой и оптико-электронной аппаратурой. Нестабильность углового положения будет проявляться в основном из-за температурных деформаций. Использование новых композитных материалов и систем термостатирования позволяет добиться стабильности конструкции на уровне не более 3...4 угл.с за все время эксплуатации, за время одного включения аппаратуры эта величина будет меньше.

Несмотря на перечисленные меры, вследствие различных причин взаимное расположение ЗД может со временем все-таки изменяться. Поэтому в процессе эксплуатации аппаратуры обязательно проводят периодические работы в режиме калибровки. Режим калибровки следует выполнять на отрезке орбиты, когда спутник перемещается с наименьшей скоростью с отстройкой звездных датчиков от возмущающих факторов.

На первом этапе режима калибровки блока ЗД уточняется расчет взаимного положения ЗД. Данный режим реализуется за счет использования измерений осуществляемых ЗД.

На втором этапе режима калибровки уточняется взаимное расположение базового ЗД и ПСК. Данный режим реализуется за счет совместной работы ЗД и аппаратуры ДЗЗ. Вычисления оптимально проводить на наземном пункте обработки информации, а затем передавать калибровочные коэффициенты для записи в память аппаратуры.

Расчет равноточной ориентации приборной системы координат в ИСК. На аппаратуру в общем случае будет устанавливаться $n \geq 2$ ЗД, расположенных оптимальным образом. Каждый i -й ЗД будет устанавливаться с углами $(A_i, h - i, w_i)$ в ПСК (рис. 4).

Матрица перехода от СК ЗД к ПСК будет иметь вид

$$M_{\text{ЗД} \rightarrow \text{ПСК}} = \begin{bmatrix} \cos h_i \cos w_i \sin A_i \sin w_i - \cos A_i \cos w_i \sin h_i - \cos A_i \sin w_i - \sin A_i \cos w_i \sin h_i \\ -\cos h_i \sin w_i \sin A_i \cos w_i + \cos A_i \sin h_i \sin w_i \sin A_i \sin h_i \sin w_i - \cos A_i \cos w_i \\ \sin h_i \cos A_i \cos h_i \sin A_i \cos h_i \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Рассмотрим два ЗД: ЗД1 и ЗД2. Выберем ЗД1 за базовый. Матрицу перехода от СК ЗД2 к СК ЗД1 можно записать следующим образом:

$$M_{\text{ЗД2} \rightarrow \text{ЗД1}} = M_{\text{ЗД2} \rightarrow \text{ИСК}} \cdot M_{\text{ИСК} \rightarrow \text{ЗД1}} = M_{\text{ЗД2} \rightarrow \text{ПСК}} \cdot M_{\text{ПСК} \rightarrow \text{ЗД1}}, \quad (3)$$

где $M_{\text{ИСК} \rightarrow \text{ЗД1}} = (M_{\text{ЗД1} \rightarrow \text{ИСК}})^{-1}$, $M_{\text{ПСК} \rightarrow \text{ЗД2}} = (M_{\text{ЗД2} \rightarrow \text{ПСК}})^{-1}$ вычисляются на основе формул (1) и (2).

Запишем произведение матриц из формулы (3) как

$$M_{\text{ЗД2} \rightarrow \text{ИСК}} \cdot M_{\text{ИСК} \rightarrow \text{ЗД1}} = R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Найдем значения элементов матрицы, собрав их вместе, получим:

$$r_{11} = \cos \beta_1 \cos \beta_2 \sin \theta_1 \sin \theta_2 + (\sin \alpha_1 \cos \theta_1 + \cos \alpha_1 \sin \beta_1 \sin \theta_1)(\sin \alpha_2 \cos \theta_2 + \cos \alpha_2 \sin \beta_2 \sin \theta_2) + (\cos \alpha_1 \cos \theta_1 - \sin \alpha_1 \sin \beta_1 \sin \theta_1)(\cos \alpha_2 \cos \theta_2 - \sin \alpha_2 \sin \beta_2 \sin \theta_2);$$

$$r_{12} = \cos \beta_1 \cos \beta_2 \cos \theta_1 \sin \theta_2 - (\sin \alpha_1 \sin \theta_1 - \cos \alpha_1 \sin \beta_1 \cos \theta_1)(\sin \alpha_2 \cos \theta_2 + \cos \alpha_2 \sin \beta_2 \sin \theta_2) - (\cos \alpha_1 \sin \theta_1 + \sin \alpha_1 \sin \beta_1 \cos \theta_1)(\cos \alpha_2 \cos \theta_2 - \sin \alpha_2 \sin \beta_2 \sin \theta_2);$$

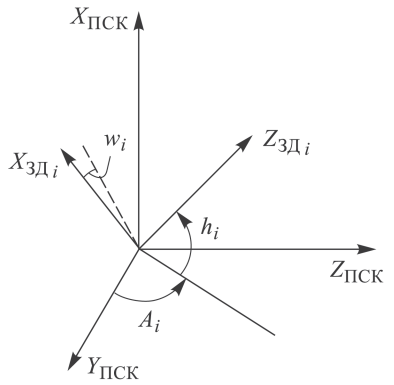


Рис. 4. Связь ПСК и системы координат ЗД

$$\begin{aligned}
r_{13} &= \cos \alpha_1 \cos \beta_1 (\sin \alpha_2 \cos \theta_2 + \cos \alpha_2 \sin \beta_2 \sin \theta_2) - \\
&- \cos \beta_1 \sin \alpha_1 (\cos \alpha_2 \cos \theta_2 - \sin \alpha_2 \sin \beta_2 \sin \theta_2) - \cos \beta_2 \sin \beta_1 \sin \theta_2; \\
r_{21} &= \cos \beta_1 \cos \beta_2 \sin \theta_1 \cos \theta_2 - \\
&- (\sin \alpha_1 \cos \theta_1 + \cos \alpha_1 \sin \beta_1 \sin \theta_1) (\sin \alpha_2 \sin \theta_2 - \cos \alpha_2 \sin \beta_2 \cos \theta_2) - \\
&- (\cos \alpha_1 \cos \theta_1 - \sin \alpha_1 \sin \beta_1 \sin \theta_1) (\cos \alpha_2 \sin \theta_2 + \sin \alpha_2 \sin \beta_2 \cos \theta_2); \\
r_{22} &= \cos \beta_1 \cos \beta_2 \cos \theta_1 \cos \theta_2 + \\
&+ (\sin \alpha_1 \sin \theta_1 - \cos \alpha_1 \sin \beta_1 \cos \theta_1) (\sin \alpha_2 \sin \theta_2 + \cos \alpha_2 \sin \beta_2 \cos \theta_2) + \\
&+ (\cos \alpha_1 \sin \theta_1 + \sin \alpha_1 \sin \beta_1 \cos \theta_1) (\cos \alpha_2 \sin \theta_2 + \sin \alpha_2 \sin \beta_2 \cos \theta_2); \\
r_{23} &= \sin \alpha_1 \cos \beta_1 (\cos \alpha_2 \sin \theta_2 + \sin \alpha_2 \sin \beta_2 \cos \theta_2) - \\
&- \cos \alpha_1 \cos \beta_1 (\sin \alpha_2 \sin \theta_2 - \cos \alpha_2 \sin \beta_2 \cos \theta_2) - \cos \beta_2 \sin \theta_1 \cos \theta_2; \\
r_{31} &= \cos \alpha_2 \cos \beta_2 (\sin \alpha_1 \cos \theta_1 + \cos \alpha_1 \sin \beta_1 \sin \theta_1) - \\
&- \cos \beta_2 \sin \alpha_2 (\cos \alpha_1 \cos \theta_1 - \sin \alpha_1 \sin \beta_1 \sin \theta_1) - \cos \beta_1 \sin \beta_2 \sin \theta_1; \\
r_{32} &= \sin \alpha_2 \cos \beta_2 (\cos \alpha_1 \sin \theta_1 + \sin \alpha_1 \sin \beta_1 \cos \theta_1) - \\
&- \cos \alpha_2 \cos \beta_2 (\sin \alpha_1 \sin \theta_1 - \cos \alpha_1 \sin \beta_1 \cos \theta_1) - \cos \beta_1 \sin \beta_2 \cos \theta_1; \\
r_{33} &= \sin \beta_1 \sin \beta_2 + \cos \alpha_1 \cos \alpha_2 \cos \beta_1 \cos \beta_2 + \\
&\quad + \sin \alpha_1 \sin \alpha_2 \cos \beta_1 \cos \beta_2.
\end{aligned}$$

Аналогичным образом обозначим произведение матриц из правой части формулы (3):

$$M_{3Д2 \rightarrow ПСК} \cdot M_{ПСК \rightarrow 3Д1} = P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Полученная матрица P содержит известные переменные A_i, h_i, w_i , которые были определены при сборке и юстировке аппаратуры ДЗЗ.

В третьей строке матрицы R присутствует только переменная θ_1 , которая требует уточнения. Проще всего переменную θ_1 вычислить, составив уравнение из элементов матриц P и R , и приравняв их между собой:

$$\begin{aligned}
r_{31} = p_{31} \Rightarrow \\
\cos \alpha_2 \cos \beta_2 (\sin \alpha_1 \cos \theta_1 + \cos \alpha_1 \sin \beta_1 \sin \theta_1) - \\
- \cos \beta_2 \sin \alpha_2 (\cos \alpha_1 \cos \theta_1 - \sin \alpha_1 \sin \beta_1 \sin \theta_1) - \\
- \cos \beta_1 \sin \beta_2 \sin \theta_1 = p_{31} \Rightarrow
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& (\cos \alpha_2 \cos \beta_2 \cos \alpha_1 \sin \beta_1 + \cos \beta_2 \sin \alpha_2 \sin \alpha_1 \sin \beta_1 - \\
& - \cos \beta_1 \sin \beta_2) \sin \theta_1 + \\
& + (\cos \alpha_2 \cos \beta_2 \sin \alpha_1 - \cos \beta_2 \sin \alpha_2 \cos \alpha_1) \cos \theta_1 = p_{31} \Rightarrow \\
& (\cos \beta_2 \sin \beta_1 \cos(\alpha_1 - \alpha_2) - \cos \beta_1 \sin \beta_2) \sin \theta_1 + \\
& + \cos \beta_2 \sin(\alpha_1 - \alpha_2) \cos \theta_1 = p_{31}.
\end{aligned}$$

Введем обозначение:

$$\begin{aligned}
A &= \cos \beta_2 \sin \beta_1 \cos(\alpha_1 - \alpha_2) - \cos \beta_1 \sin \beta_2; \\
B &= \cos \beta_2 \sin(\alpha_1 - \alpha_2); \\
t &= \operatorname{tg} \frac{\theta_1}{2}.
\end{aligned}$$

Применив обозначения к полученному ранее уравнению, получим

$$\begin{aligned}
A \frac{2t}{1+t^2} + B \frac{1-t^2}{1+t^2} &= p_{31} \Rightarrow \\
(p_{31} + B)t^2 - 2At + p_{31} - B &= 0,
\end{aligned}$$

откуда вычисляется значение $t = \operatorname{tg} \frac{\theta_1}{2}$, а затем θ_1 , лишние решения отбрасываются путем сравнения с исходным значением θ_1 .

В итоге получаем угловые параметры $\alpha_1, \beta_1, \theta_1$ с уточненным значением угла θ_1 , погрешность определения которого не превышает погрешность определения углов α_1, β_1 , что позволяет говорить о формировании равноточной трехосной ориентации блока ЗД в инерциальном пространстве.

Калибровка взаимной ориентации ЗД в полете. Калибровка взаимного положения ЗД заключается в уточнении угловых координат (A_i, h_i, w_i) , определенных ранее на этапе сборки. Для этого примем ЗД1 за базовый, предположим, что он установлен без погрешностей в ПСК, таким образом требуется уточнить координаты (A_2, h_2, w_2) , полагая (A_1, h_1, w_1) известными.

Вычислим значения элементов матрицы P из формулы (5):

$$\begin{aligned}
p_{11} &= (\cos A_1 \sin w_1 + \sin A_1 \cos w_1 \sin h_1) \times \\
&\times (\cos A_2 \sin w_2 + \sin A_2 \cos w_2 \sin h_2) + \\
&+ (\sin A_1 \sin w_1 - \cos A_1 \cos w_1 \sin h_1) \times \\
&\times (\sin A_2 \sin w_2 - \cos A_2 \cos w_2 \sin h_2) + \\
&+ \cos h_1 \cos h_2 \cos w_1 \cos w_2; \\
p_{12} &= (\sin A_1 \cos w_1 + \cos A_1 \sin w_1 \sin h_1) \times \\
&\times (\sin A_2 \sin w_2 - \cos A_2 \cos w_2 \sin h_2) + \\
&+ (\cos A_1 \sin w_1 - \sin A_1 \sin w_1 \sin h_1) \times \\
&\times (\cos A_2 \sin w_2 + \sin A_2 \cos w_2 \sin h_2) - \\
&- \cos h_1 \cos h_2 \sin w_1 \cos w_2;
\end{aligned}$$

$$p_{13} = \cos A_1 \cos h_1 (\sin A_2 \sin w_2 - \cos A_2 \cos w_2 \sin h_2) - \\ - \sin A_1 \cos h_1 (\cos A_2 \sin w_2 + \sin A_2 \cos w_2 \sin h_2) + \\ + \sin h_1 \cos h_2 \cos w_2;$$

$$p_{21} = (\cos A_1 \sin w_1 + \sin A_1 \cos w_1 \sin h_1) \times \\ \times (\cos A_2 \cos w_2 + \sin A_2 \sin w_2 \sin h_2) - \\ - (\sin A_1 \sin w_1 - \cos A_1 \cos w_1 \sin h_1) \times \\ \times (\sin A_2 \cos w_2 + \cos A_2 \sin w_2 \sin h_2) - \\ - \cos h_1 \cos h_2 \cos w_1 \sin w_2;$$

$$p_{22} = (\sin A_1 \cos w_1 + \cos A_1 \sin w_1 \sin h_1) \times \\ \times (\sin A_2 \cos w_2 + \cos A_2 \sin w_2 \sin h_2) + \\ + (\cos A_1 \cos w_1 - \sin A_1 \sin w_1 \sin h_1) \times \\ \times (\cos A_2 \cos w_2 - \sin A_2 \sin w_2 \sin h_2) + \\ + \cos h_1 \cos h_2 \sin w_1 \sin w_2;$$

$$p_{23} = \cos A_1 \cos h_1 (\sin A_2 \cos w_2 + \cos A_2 \sin w_2 \sin h_2) - \\ - \sin A_1 \cos h_1 (\cos A_2 \cos w_2 - \sin A_2 \sin w_2 \sin h_2) - \\ - \sin h_1 \cos h_2 \sin w_2;$$

$$p_{31} = \cos A_2 \cos h_2 (\sin A_1 \sin w_1 - \cos A_1 \cos w_1 \sin h_1) - \\ - \sin A_2 \cos h_2 (\cos A_1 \sin w_1 + \sin A_1 \cos w_1 \sin h_1) + \\ + \cos h_1 \sin h_2 \cos w_1;$$

$$p_{32} = \cos A_2 \cos h_2 (\sin A_1 \cos w_1 + \cos A_1 \sin w_1 \sin h_1) - \\ - \sin A_2 \cos h_2 (\cos A_1 \cos w_1 - \sin A_1 \sin w_1 \sin h_1) - \\ - \cos A_1 \sin h_2 \sin w_1;$$

$$p_{33} = \cos A_1 \cos h_1 \cos A_2 \cos h_2 + \\ + \sin A_1 \cos h_1 \sin A_2 \cos h_2 + \\ + \sin h_1 \sin h_2.$$

Матрицы R и P — это матрицы размера 3×3 . Приравняв каждый элемент третьей строки одной матрицы соответствующим элементам другой матрицы, получаем:

$$\begin{aligned} r_{31}(\alpha_1, \beta_1, \theta_1, \alpha_2, \beta_2,) &= p_{31}(A_1, h_1, w_1, A_2, h_2); \\ r_{32}(\alpha_1, \beta_1, \theta_1, \alpha_2, \beta_2,) &= p_{32}(A_1, h_1, w_1, A_2, h_2); \\ r_{33}(\alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2,) &= p_{33}(A_1, h_1, A_2, h_2). \end{aligned} \quad (6)$$

Значения θ_1, A_2, h_2 известны приближенно. Очевидно, что с учетом погрешностей величины r и p не равны друг другу. Найдем поправки к $\delta\theta_1, \delta A_2, \delta h_2$.

Применив ряд Тейлора, напишем уравнения поправок:

$$\begin{aligned} r_{31} + \frac{\partial r_{31}}{\partial \theta_1} \delta \theta_1 - p_{31} - \frac{\partial p_{31}}{\partial A_2} \delta A_2 - \frac{\partial p_{31}}{\partial h_2} \delta h_2 &= v; \\ r_{32} + \frac{\partial r_{32}}{\partial \theta_1} \delta \theta_1 - p_{32} - \frac{\partial p_{32}}{\partial A_2} \delta A_2 - \frac{\partial p_{32}}{\partial h_2} \delta h_2 &= v'; \\ r_{33} + \frac{\partial r_{33}}{\partial \theta_1} \delta \theta_1 - p_{33} - \frac{\partial p_{33}}{\partial A_2} \delta A_2 - \frac{\partial p_{33}}{\partial h_2} \delta h_2 &= v''. \end{aligned} \quad (7)$$

Неизвестными в этих уравнениях являются поправки к приближенным значениям θ_1, A_2, h_2 , а коэффициентами при неизвестных — частные производные от функций (6) по соответствующим переменным.

Обозначим первую частную производную через a и вычислим ее следующим образом:

$$\begin{aligned} a = \frac{\partial r_{31}}{\partial \theta_1} &= \frac{\partial}{\partial \theta_1} (\cos \alpha_2 \cos \beta_2 (\sin \alpha_1 \cos \theta_1 + \cos \alpha_1 \sin \beta_1 \sin \theta_1) - \\ &- \cos \beta_2 \sin \alpha_2 (\cos \alpha_1 \cos \theta_1 - \sin \alpha_1 \sin \beta_1 \sin \theta_1) - \cos \beta_1 \sin \beta_2 \sin \theta_1) = \\ &= \sin \alpha_2 \cos \beta_2 (\cos \alpha_1 \sin \theta_1 + \sin \alpha_1 \sin \beta_1 \cos \theta_1) - \\ \cos \alpha_2 \cos \beta_2 (\sin \alpha_1 \sin \theta_1 - \cos \alpha_1 \sin \beta_1 \cos \theta_1) - \cos \beta_1 \sin \beta_2 \cos \theta_1 &= r_{32}. \end{aligned}$$

Аналогично можно вычислить остальные частные производные. Сбрав их вместе, получим:

$$a = \frac{\partial r_{31}}{\partial \theta_1} = r_{32}; \quad a' = \frac{\partial r_{32}}{\partial \theta_1} = -r_{31}; \quad a'' = \frac{\partial r_{33}}{\partial \theta_1} = 0;$$

$$\begin{aligned} b = \frac{\partial p_{31}}{\partial A_2} &= -\sin A_2 \cos h_2 (\sin A_1 \sin w_1 - \cos A_1 \cos w_1 \sin h_1) - \\ &- \cos A_2 \cos h_2 (\cos A_1 \sin w_1 + \sin A_1 \cos w_1 \sin h_1); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b' = \frac{\partial p_{32}}{\partial A_2} &= -\sin A_2 \cos h_2 (\sin A_1 \cos w_1 + \cos A_1 \sin w_1 \sin h_1) - \\ &- \cos A_2 \cos h_2 (\cos A_1 \cos w_1 - \sin A_1 \sin w_1 \sin h_1); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b'' = \frac{\partial p_{33}}{\partial A_2} &= -\cos A_1 \cos h_1 \sin A_2 \cos h_2 + \\ &+ \sin A_1 \cos h_1 \cos A_2 \cos h_2; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} c = \frac{\partial p_{31}}{\partial h_2} &= -\cos A_2 \sin h_2 (\sin A_1 \sin w_1 - \cos A_1 \cos w_1 \sin h_1) + \\ &+ \sin A_2 \sin h_2 (\cos A_1 \sin w_1 + \sin A_1 \cos w_1 \sin h_1) + \\ &+ \cos h_1 \cos h_2 \cos w_1; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} c' = \frac{\partial p_{32}}{\partial h_2} &= -\cos A_2 \sin h_2 (\sin A_1 \cos w_1 + \cos A_1 \sin w_1 \sin h_1) + \\ &+ \sin A_2 \sin h_2 (\cos A_1 \cos w_1 - \sin A_1 \sin w_1 \sin h_1) - \\ &- \cos A_1 \cos h_2 \sin w_1; \end{aligned}$$

$$c'' = \frac{\partial p_{33}}{\partial h_2} = -\cos A_1 \cos h_1 \cos A_2 \sin h_2 - \\ - \sin A_1 \cos h_1 \sin A_2 \sin h_2 + \sin h_1 \cos h_2.$$

Представим уравнения поправок в следующем виде:

$$\begin{aligned} r_{31} + a\delta\theta_1 - p_{31} - b\delta A_2 - c\delta h_2 &= v; \\ r_{32} + a'\delta\theta_1 - p_{32} - b'\delta A_2 - c'\delta h_2 &= v'; \\ r_{33} - p_{33} - b''\delta A_2 - c''\delta h_2 &= v''. \end{aligned} \quad (8)$$

Уравнения решаются методом последовательных приближений, пока не выполнен критерий останковки итерационного процесса, в качестве которого можно взять выполнение условия малости приращения аргумента $|x_{n+1} - x_n| < \varepsilon$, где в качестве аргумента подставляются значения θ_1, A_2, h_2 , а ε — задаваемая малая величина.

В результате решения приведенных уравнений по методу Ньютона [5] вычисляются уточненные значения взаимного положения ЗД A_2, h_2 .

Добавим к уравнениям (6) еще уравнения:

$$\begin{aligned} r_{13}(\alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2, \theta_2) &= p_{13}(A_1, h_1, A_2, h_2, w_2), \\ r_{23}(\alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2, \theta_2) &= p_{23}(A_1, h_1, A_2, h_2, w_2). \end{aligned} \quad (9)$$

Откуда, используя приведенный алгоритм, найдем оставшееся значение w_2 .

В итоге получим уточненные параметры положения ЗД2 (A_2, h_2, w_2). Значения усредняются для нескольких последовательных измерений ЗД в режиме калибровки.

Аналогично уточняются параметры A_i, h_i, w_i взаимной угловой ориентации каждого ЗД, входящего в состав ОЭА, относительно ЗД выбранного базовым.

Калибровка расположения базового ЗД в ПСК. Взаимное расположение базового ЗД и ПСК, имеющей физическую реализацию в виде базовой куб-призмы, было однозначно определено при сборке и юстировке, однако при эксплуатации на орбите вследствие многочисленных факторов этот параметр претерпит изменения. Для вычисления поправочных коэффициентов, согласующих положение СК ЗД1 в ПСК, применяют два основных метода: съемку опорных точек на Земле и режим астрономического контроля согласования осей (АКСО). Выбор одного из этих методов во многом зависит от возможностей и предназначения оптико-электронной аппаратуры.

При согласовании ПСК и СК ЗД в режиме АКСО оптико-электронной аппаратуры проводит сканирование звездного поля с постоянной угловой скоростью, получение снимков с телескопа происходит синхронно с определением ориентации ЗД. Полученные снимки анализируются, на основании известных звездных скоплений происходит

вычисление последовательностей значений матриц ориентации ПСК относительно ИСК. Используя в качестве опорных значений вычисленные по снимкам оптико-электронной аппаратуры матрицы ориентации, а также сформированные матрицы ориентации выбранного за базовый ЗД, уточняется фактическое положение ЗД в ПСК [6].

При согласовании СК телескопа и ЗД по наземным опорным точкам, решается обратная фотограмметрическая задача, исходными данными для которой являются уточненная матрица ориентации, вычисленная по значениям ЗД и положение опорной точки на кадре снимка оптико-электронной аппаратуры. Решение данной задачи основано на использовании уравнений, выражающих зависимость между координатами (x, y) точки на изображении и координатами (X, Y, Z) соответствующей точки объекта. Зная координаты точки объекта в ИСК и параметры орбиты КА, можно определить направление визирной оси оптико-электронной аппаратуры и, зная соответствующие этой точке изображения координаты ЗД в ИСК, несложно вычислить фактическое положение ЗД в ПСК [7].

В результате получим уточненные значения параметров взаимной угловой ориентации СК базового ЗД и ПСК. Параметры A_i, h_i, w_i угловой ориентации остальных ЗД относительно базового ЗД пересчитываются в соответствии с новыми значениями A_1, h_1, w_1 .

Выводы. 1. Разработаны алгоритм определения равноточной ориентации орбитального телескопа с использованием информации ориентации формируемой ЗД и алгоритм калибровки взаимного расположения ЗД в полете, которые позволяют реализовать точную привязку ключевых точек снимка к наземным координатам. Приведены варианты орбитальной калибровки взаимного расположения связки системы координат ЗД и ПСК оптико-электронной аппаратуры.

2. Преимуществом разработанных алгоритмов является возможность вычисления ориентации с точностью ограниченной величиной погрешности определения ориентации поперек оси визирования используемых звездных датчиков, что позволит повысить точность привязки на местности до нескольких метров.

3. Для полноценной работы необходимы результаты синхронных измерений с не менее чем двух ЗД, расположенных оптимальным образом.

4. Недостатком алгоритма является потребность в большом объеме вычислительных мощностей, что делает его реализацию в блоке управления космического аппарата затруднительной. Для устранения этого недостатка рекомендуется использовать ресурсы наземного пункта обработки информации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Заварзин В.И., Ли А.В. Методика определения элементов внешнего ориентирования для оперативной координатной привязки снимков оптико-электронной аппаратуры дистанционного зондирования Земли // Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. Вып. 9. URL: <http://engjournal.ru/articles/908/html/index.html>. С. 1–13.
2. Бессонов Р.В., Дятлов С.А. Обзор звездных датчиков ориентации космических аппаратов // Сб. трудов Всеросс. науч.-техн. конф. “Современные проблемы ориентации и навигации космических аппаратов”, 2008. С. 11.
3. Алгоритмы совместной обработки данных измерений звездных координаторов и микроэлектромеханических датчиков угловой скорости / Г.А. Аванесов, Р.В. Бессонов, С.А. Дятлов, А.Н. Куркина, В.В. Сазонов // Сб. трудов Второй Всеросс. науч.-техн. конф. “Современные проблемы ориентации и навигации космических аппаратов”, 2011. С. 36.
4. Федосеев В.И., Колосов М.П. Оптико-электронные приборы ориентации и навигации космических аппаратов: Учеб. пособие. М.: Логос, 2007. 248 с.
5. Амосов А.А., Дубинский Ю.А., Копченова Н.П. Вычислительные методы для инженеров. М.: Высш. шк., 1994. 544 с.
6. Сомов Е.И., Бутырин С.А. Уточнение ориентации космического телескопа на основе апостериорной бортовой обработки измерительной информации // Изв. Самарского научного центра РАН. 2008. Т. 10. № 3. С. 790–798.
7. Лобанов А.Н. Фотограмметрия. М.: Недра, 1984. 552 с.

REFERENCES

- [1] Zavarzin V.I., Li A.V. Evaluation method of exterior orientation elements for remote sensing optoelectronic devices operational coordinate referencing pictures. *Jelekt. nauchno-tehn. Izd. “Inzhenernyj zhurnal: nauka i innovacii” MGTU im. Baumana* [El. Sc.-Techn. Publ. “Eng. J.: Science and Innovation” of Bauman MSTU], 2013 iss. 9. <http://engjournal.ru/articles/908/html/index.html>. С. 1–13.
- [2] Bessonov R.V., Dyatlov S.A. Overview of stellar spacecraft orientation sensors *Sb. Tr. Vserossiysk. Nauch.-tekhn. Konf. “Sovremennye problemy orientatsii i navigatsii kosmicheskikh apparatov”* [Proc. All-Russ. Conf. “Modern problems of spacecraft orientation and navigation”], 2008, p. 11 (in Russ.).
- [3] Avanesov G.A., Bessonov R.V., Dyatlov S.A., Kurkina A.N., Sazonov V.V. Algorithms for co-processing of the measurement data of stellar coordinators and MEMS angular rate sensors. *Sb. Tr. Vtoroy Vserossiysk. Nauch.-tekhn. Konf. “Sovremennye problemy orientatsii i navigatsii kosmicheskikh apparatov”* [Proc. 2nd All-Russ. Conf. “Modern problems of spacecraft orientation and navigation”], 2011, p. 36 (in Russ.).
- [4] Fedoseev V.I., Kolosov M.P. Optiko-elektronnye pribory orientatsii i navigatsii kosmicheskikh apparatov [Optoelectronic devices for spacecraft orientation and navigation: Tutorial]. Moscow, Logos Publ., 2007. 248 p.
- [5] Amosov A.A., Dubinskiy Yu.A., Kopchenova N.P. Vychislitel'nye metody dlya inzhenerov [Computational Methods for Engineers]. Moscow, Vyssh. shk. Publ., 1994. 544 p.
- [6] Somov E.I., Butyrin S.A. Refinement of space telescope orientation based on a posteriori onboard measurement information processing. *Izv. Samarskogo nauch. tsentra RAN* [Bull. of Samara Research Center, Russian Academy of Sciences], 2008, vol. 10, no. 3, pp. 790–798 (in Russ.).
- [7] Lobanov A.N. Fotogrammetriya [Photogrammetry]. Moscow, Nedra Publ., 1984, 552 p.

Статья поступила в редакцию 10.04.2014

Заварзин Валерий Иванович — д-р техн. наук, профессор кафедры “Лазерные и оптико-электронные системы”, декан факультета “Оптико-электронное приборостроение” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 100 научных работ в области оптического приборостроения.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Zavarzin V.I. — Dr. Sci. (Eng.), professor of “Laser and Optico-Electronic Devices” department, dean of “Optical-Electronic Devices Engineering” faculty of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 100 publications in the field of optical device engineering.

Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Ли Александр Викторович — аспирант кафедры “Лазерные и оптико-электронные системы” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 17 научных работ в области оптического приборостроения.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Li A.V. — post-graduate of “Laser and Optico-Electronic Devices” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 17 publication in the field of optical device engineering.

Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Ломоносов Евгений Михайлович — инженер ОАО “Красногорский завод имени С.А. Зверева”. Автор двух научных работ в области оптического приборостроения.

ОАО “Красногорский завод имени С.А. Зверева”, Российская Федерация, 143403, Московская обл., г. Красногорск, Речная ул., д. 8.

Lomonosov E.M. — engineer of the S.A. Zverev Krasnogorsky Zavod. Author of two publication in the field of optical device engineering.

S.A. Zverev Krasnogorsky Zavod, Rechnaya ul. 8, Krasnogorsk, Moscow region, 143403 Russian Federation.