

Г. А. АВАНЕСОВ, Я. Л. ЗИМАН, В. А. КРАСИКОВ,  
Н. И. СЧЕТКОВА, В. Г. СОБЧУК, А. А. ФОРШ

*Институт космических исследований РАН  
Москва*

## АЛГОРИТМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОРИЕНТАЦИИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ПО БОРТОВЫМ АСТРОИЗМЕРЕНИЯМ

Рассматриваются вопросы алгоритмического обеспечения бортовой телевизионной астроизмерительной системы с ПЗС-матрицей, предназначенной для точного определения ориентации КА в реальном масштабе времени, основанной на получении и анализе изображений участков звездного неба.

**Введение.** Одна из наиболее важных задач, решаемых служебными системами космических аппаратов, — определение параметров ориентации осей КА в инерциальной системе координат.

Появление приборов с зарядовой связью и быстродействующих микропроцессорных систем позволило разработать методику высокоточного определения трехосной ориентации КА, основанную на получении и анализе на его борту изображений участков звездного неба практически в реальном масштабе времени.

Начиная с 1980 г., разработка датчиков астроориентации такого типа осуществляется в ИКИ РАН (Москва). Совместно с предприятием „Карл Цейс Йена“ (Германия) был разработан оптический звездный датчик „Астро-1М“, который в 1990—2001 гг. успешно функционировал на борту станции „Мир“. В 1999 г. в ИКИ РАН разработаны приборы БОКЗ (блоки определения координат звезд), функционирующие в настоящее время на борту геостационарного спутника связи „Ямал-100“ и на борту Международной космической станции.

В этой модификации прибора вычислительные функции были распределены между собственно БОКЗ, осуществляющим первичную обработку изображения участка звездного неба на аппаратном уровне, и бортовой вычислительной машиной, содержащей адаптированную версию математического обеспечения и вариант бортового звездного каталога.

В настоящее время разработан прибор второго поколения БОКЗ-М, имеющий в своем составе встроенный сигнальный процессор с тактовой частотой 32 МГц. Это позволило не только реализовать все вычислительные процедуры обработки и хранения бортового звездного каталога внутри прибора, но и существенно расширить состав программного обеспечения. Прибор БОКЗ-М представляет собой аппаратно-программный комплекс, обеспечивающий съемку произвольных участков звездного неба и определение параметров ориентации КА в геоцентрической ИСК.

Общий вид приборов БОКЗ и БОКЗ-М приведен на рис. 1 и 2 соответственно.\*

**Основные процедуры обработки информации в приборе БОКЗ-М.** Обработка изображений участков звездного неба, регистрируемых ПЗС-матрицей прибора БОКЗ-М, предполагает выполнение следующих процедур:

— предварительная обработка;

\* Подробное описание приборов БОКЗ и БОКЗ-М, принципы их действия и технические характеристики приведены в статье Г. А. Аванесова, С. В. Воронкова, А. А. Форша, М. И. Куделина „Звездные координаторы систем ориентации космических аппаратов“, см. настоящий выпуск, с. 66—69.

- локализация пространственно-связных образований — изображений группы звезд, попадающих на матрицу ПЗС, — с вычислением координат их энергетических центров;
- идентификация локализованных объектов в бортовом звездном каталоге и приведение идентифицированных звезд на видимое место;
- уточнение параметров ориентации осей ПСК БОКЗ-М относительно осей ИСК.

*Предварительная обработка.* Теоретически на этапе предварительной обработки необходимо корректировать полученные с помощью ПЗС-матрицы изображения участков звездного неба для учета неравномерности чувствительности элементов по полю матрицы, внутри-элементной неоднородности чувствительности и неэффективности переноса заряда, а также попадания изображений звезд на дефектные участки ПЗС-матрицы. Анализ причин, влияющих на точность определения координат энергетических центров изображений точечных источников излучения, позволил установить следующее.

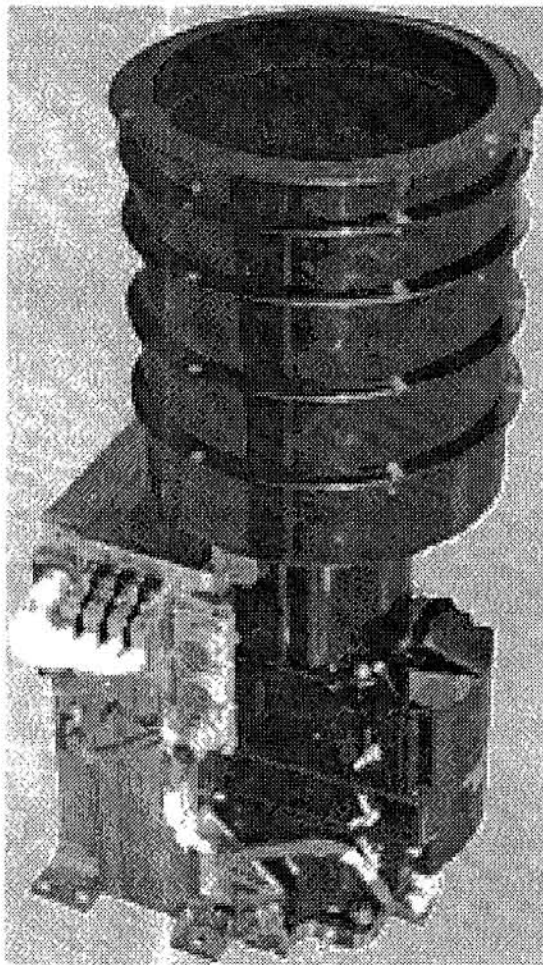


Рис. 1

Прежде всего, необходимо учитывать попадание изображений звезд на дефектные участки ПЗС-матрицы. Вторая по значимости причина — неоднородность чувствительности ПЗС на субэлементном уровне. Неоднородность чувствительности по полю матрицы и неэффективность переноса заряда в гораздо меньшей степени влияют на характеристики сигнала, чем смещение координат центров изображений.

Кроме того, следует учитывать неравномерность фонового излучения, которое (так же как неравномерность темнового тока и неравномерность чувствительности по полю ПЗС) влияет на величину порогового уровня принятия решения при проведении процедуры локализации. Поэтому на этапе предварительной обработки целесообразно выполнять сглаживание низкочастотной фоновой составляющей путем использования какого-либо низкочастотного двумерного фильтра. Параметры фильтра должны быть такими, чтобы искажения распределения освещенности в изображении звезд не приводили к значимому смещению координат их энергетических центров.

В рассматриваемом случае в качестве низкочастотного фильтра использовалась следующая процедура. Для фрагмента размером  $13 \times 13$  элементов изображения вычислялось среднее значение освещенности, которое затем вычиталось из значения освещенности центрального элемента фрагмента. Процедура повторялась со сдвигом на элемент до конца строки и со сдвигом на одну строку до конца кадра.

Описанная процедура, реализованная на спецпроцессоре прибора БОКЗ-М, позволяет выполнять сглаживание в темпе считывания информации с ПЗС-матрицы (0,6 с), после чего в памяти спецпроцессора отыскивается кадр, содержащий изображения звезд на практически нулевом фоне. Кроме того, в темпе считывания определяются среднее значение освещенности по кадру и дисперсия.

Описанная процедура, реализованная на спецпроцессоре прибора БОКЗ-М, позволяет выполнять сглаживание в темпе считывания информации с ПЗС-матрицы (0,6 с), после чего в памяти спецпроцессора отыскивается кадр, содержащий изображения звезд на практически нулевом фоне. Кроме того, в темпе считывания определяются среднее значение освещенности по кадру и дисперсия.

*Локализация изображений звезд и вычисление координат их энергетических центров.* Эта процедура выполняется на этапе построчного просмотра изображения, хранящегося в

памяти спецпроцессора, после проведения процедуры сглаживания. В процессе просмотра значения освещенности элементов изображения в градациях АЦП сравниваются с пороговым значением, и те элементы изображения, освещенность которых превысила пороговое значение, участвуют в формировании пространственно-связных образований — изображений групп звезд. Для сформированных изображений вычисляются координаты их энергетических центров, мощность (интегральная освещенность в градациях АЦП) и площадь (в элементах ПЗС-матрицы).

В процессе локализации происходит отбраковка расшифрованных изображений по мощности и площади, а также отбраковка изображений, попавших на дефектные элементы ПЗС-матрицы. Оставшиеся изображения ранжируются по мощности в порядке убывания, и наиболее яркие объекты (в количестве от 8 до 16) участвуют в процедуре идентификации в бортовом звездном каталоге.

Рассмотрим подробнее процесс вычисления координат энергетических центров изображений.

Как отмечалось выше, в приборе БОКЗ-М в качестве приемника изображения используется ПЗС-матрица, имеющая стабильную в геометрическом смысле дискретную растровую структуру. В этом случае для точного определения координат энергетического центра изображения точечного объекта теоретически наилучшей формой распределения освещенности в изображении звезды следует считать равномерное, а наилучшей формой изображения — прямоугольное со сторонами, параллельными строкам и столбцам ПЗС-матрицы. При этом размеры изображения не должны быть меньше размера элемента дискретизации. Поскольку в этом случае реализуется линейная зависимость между величиной смещения центра изображения и изменением освещенности в элементах ПЗС-матрицы, то для вычисления координат энергетического центра изображения можно использовать любые дифференциальные формулы.

Однако на практике такая ситуация, как правило, нереализуема. Поэтому обычно имеют дело с распределением освещенности в изображении, близким к нормальному. В этом случае остается решить вопрос об оптимальных размерах изображения: если известны вид и параметры распределения освещенности (дисперсия, характеризующая размеры изображения), то достаточно иметь изображение, размеры которого немногим превышают размеры элемента дискретизации.

Наиболее частым на практике является вариант, когда вид и параметры распределения освещенности в изображении неизвестны или значительно изменяются в пространстве и во времени. В этом случае информация о распределении основывается на измерениях сигналов (освещенности) в элементах ПЗС-матрицы, на которые спроектировалось изображение точечного источника излучения. Очевидно, что чем на большее число элементов проектируется изображение звезды, тем точнее описывается реальное дискретное распределение. С другой стороны, увеличение размеров изображения при фиксированной интегральной освещенности приводит к уменьшению значения отношения сигнал/шум, а именно эта характеристика влияет на точность вычисления координат энергетического центра изображения. Следовательно, когда вид и параметры распределения освещенности в изображении звезды неизвестны,

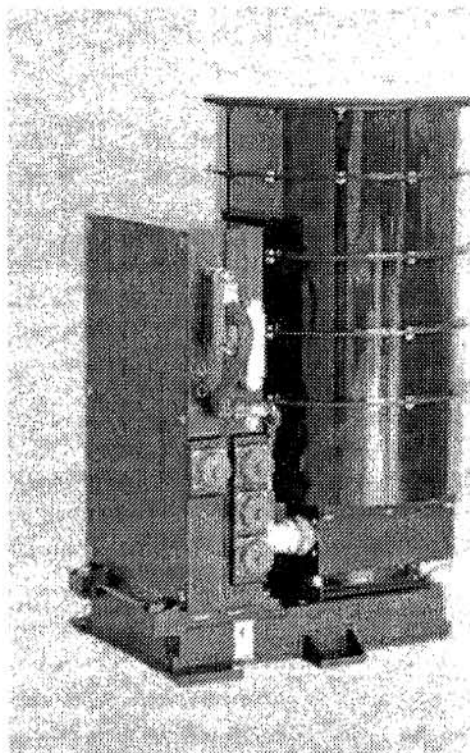


Рис. 2

оптимальный размер этого изображения будет определяться значением отношения сигнал/шум.

В данном случае наиболее целесообразно использование метода определения координат энергетического центра изображения звезды, который в дальнейшем будем называть „методом среднего взвешенного“.

Пусть  $U_{ij}$  — освещенность изображения звезды в  $i$ -м элементе  $j$ -й строки матрицы, отнесенная к интегральной освещенности в изображении, — интерпретируется как вероятность того, что энергетический центр изображения располагается в центре именно этого элемента. Тогда

$$I = \frac{\sum_i \left( \sum_j U_{ij} \right) i}{\sum_i \sum_j U_{ij}}; \quad J = \frac{\sum_j \left( \sum_i U_{ij} \right) j}{\sum_i \sum_j U_{ij}}, \quad (1)$$

где  $I, J$  — координаты энергетического центра изображения звезды в долях элемента дискретизации;  $i, j$  — вес сигнала, полученного от элемента с координатами  $i, j$ .

Обозначив

$$P_i = \frac{\sum_j U_{ij}}{\sum_i \sum_j U_{ij}}; \quad P_j = \frac{\sum_i U_{ij}}{\sum_i \sum_j U_{ij}},$$

получим

$$I = \sum_i P_i i, \quad J = \sum_j P_j j.$$

Поскольку координаты энергетического центра вычисляются как функции измеренных освещенностей  $U_{ij}$ , то погрешность вычисленных координат можно оценить дифференцированием приведенных соотношений по измеренным значениям  $U_{ij}$  с учетом их флуктуаций. Для „метода среднего взвешенного“ получим следующие выражения средних квадратических ошибок определения координат энергетического центра в зависимости от средних квадратических ошибок измерения освещенностей, регистрируемых элементами ПЗС:

$$\sigma_I^2 = \frac{\sum_i \left[ (i-I)^2 \sum_j \sigma_{U_{ij}}^2 \right]}{\left( \sum_i \sum_j U_{ij} \right)^2}, \quad \sigma_J^2 = \frac{\sum_j \left[ (j-J)^2 \sum_i \sigma_{U_{ij}}^2 \right]}{\left( \sum_i \sum_j U_{ij} \right)^2}. \quad (2)$$

Очевидно, что формулы (1) являются выражениями математического ожидания случайных величин  $i$  и  $j$ , для которых функция распределения вероятностей задана таблично значениями  $P_i$  и  $P_j$ . Числитель в формуле (2) является выражением дисперсии случайных величин  $i$  и  $j$  (центральный момент второго порядка) и характеризует линейные размеры изображения в элементах дискретизации; знаменатель в формуле (2) — интегральная освещенность (суммарное количество фотоэлектронов в изображении), которая при пуассоновском распределении трактуется как квадрат отношения сигнал/шум ( $\rho$ ). Тогда уравнения (2) примут вид

$$\sigma_I^2 = \sigma_i^2 / \rho^2, \quad \sigma_J^2 = \sigma_j^2 / \rho^2.$$

Таким образом, можно сделать вывод, что теоретически достижимая точность определения координат энергетического центра оценивается как размер изображения звезды (или размер элемента дискретизации), отнесенный к значению отношения сигнал/шум.

*Идентификация локализованных объектов в бортовом звездном каталоге.* Объем каталога составляет 8350 звезд, количество секторов — 642, среднее число звезд в секторе —  $\sim 50$ .

Реализованный в приборе БОКЗ-М метод идентификации звезд базируется как на измерении координат, так и фотометрических величин.

Рассмотрим подход к решению задачи идентификации, заключающийся в сравнении угловых расстояний между звездами, измеренных прибором БОКЗ-М и каталожных. Поскольку величины угловых расстояний инвариантны относительно систем координат, то не требуется никакой априорной информации об ориентации приборной СК относительно СК звездного каталога.

В системе координат бортового звездного каталога угловые расстояния между звездами вычисляются с помощью каталожных координат  $\alpha$  (прямое восхождение) и  $\delta$  (склонение). В результате вычислений формируется верхняя треугольная матрица угловых расстояний порядка  $N - 1$ , где  $N$  — количество звезд в одном из секторов бортового звездного каталога.

В системе координат прибора угловые расстояния между наибольшими по мощности локализованными изображениями вычисляются с помощью координат их энергетических центров и фокусного расстояния прибора. Эти угловые расстояния образуют верхнюю треугольную матрицу порядка  $M - 1$ , где  $M$  — число локализованных объектов, участвующих в процедуре идентификации.

Поскольку измеренные координаты энергетических центров изображений звезд вычисляются с ошибками и фокусное расстояние прибора также известно с ограниченной точностью, то вычисленные угловые расстояния в обеих системах координат не будут совпадать идеально. В принципе угловое расстояние в СК прибора (далее — приборное) в пределах заданной  $\epsilon$ -окрестности можно сравнить с несколькими угловыми расстояниями в СК звездного каталога (далее — каталожными), включая истинное. Размер  $\epsilon$ -окрестности следует выбирать таким образом, чтобы избежать при сравнении пропуска истинного каталожного углового расстояния. Выбор слишком большой величины  $\epsilon$ -окрестности приведет, возможно, к большому числу ложных сравнений, что, в свою очередь, приведет к значительным затратам машинного времени и к неоднозначной идентификации звезд.

С целью минимизации количества вычислительных операций и повышения вероятности правильной идентификации была реализована следующая процедура.

Перед началом вычислений каталожных и приборных угловых расстояний звезды в бортовом каталоге и их изображения ранжируются по звездным величинам и по интегральным освещенностям.

Процедура сравнения приборных угловых расстояний с матрицей каталожных угловых расстояний реализуется следующим образом.

1. Первое приборное угловое расстояние (1 2) сравнивается с каталожным угловым расстоянием до тех пор, пока не произойдет первое совпадение.

2. После этого второе приборное угловое расстояние (2 3) сравнивается только с каталожными угловыми расстояниями, находящимися в двух конкретных строках матрицы, соответствующих номерам двух каталожных звезд в первой сравнивавшейся паре. Если совпадение произошло, то проверяется совпадение углового расстояния (1 3) в ПСК и соответствующего каталожного углового расстояния. Если и это совпадение произошло, то очередное приборное расстояние (3 4) сравнивается с каталожными угловыми расстояниями, но уже только в одной строке матрицы.

3. Процедура таких сравнений продолжается до тех пор, пока цепочка приборных угловых расстояний не закончится (не замкнется или не прервется).

4. В случае прерывания цепочки происходит ее запоминание и осуществляется возврат на один шаг, после чего поиск в соответствующей строке матрицы каталожных угловых расстояний продолжается. Если и в этом случае совпадения не произойдет, последует возврат еще на один шаг. В результате таких несовпадений может произойти возврат к сравнению

первого приборного углового расстояния с последующими элементами матрицы каталожных угловых расстояний. Таким образом, в результате выполнения этой процедуры произойдет выделение всех возможных укороченных и полных замкнутых цепочек. За истинную последовательность принимается та, которая имеет максимальную длину и минимальную сумму квадратов разностей измеренных и каталожных угловых расстояний, если длина цепочек одинакова.

*Уточнение параметров ориентации осей ПСК БОКЗ-М относительно осей ИСК.* В используемом алгоритме в качестве модели измерений принималась модель, базирующаяся на условии коллинеарности направлений на одноименные точки в обеих системах координат. При этом измеренные значения координат энергетических центров изображений звезд связаны с параметрами модели измерений следующими соотношениями:

$$x_i = -f' \frac{\alpha_{11}l_i + \alpha_{12}m_i + \alpha_{13}n_i}{\alpha_{31}l_i + \alpha_{32}m_i + \alpha_{33}n_i} + x_0 + \delta x_i;$$

$$y_i = -f' \frac{\alpha_{21}l_i + \alpha_{22}m_i + \alpha_{23}n_i}{\alpha_{31}l_i + \alpha_{32}m_i + \alpha_{33}n_i} + y_0 + \delta y_i,$$

здесь  $x_i, y_i$  — измеренные значения координат энергетических центров изображений звезд;  $f', x_0, y_0$  — линейные элементы внутреннего ориентирования прибора БОКЗ-М (фокусное расстояние и координаты главной точки);  $l_i, m_i, n_i$  — направляющие косинусы звезд в СК бортового звездного каталога;  $\delta x_i, \delta y_i$  — остаточные рассогласования по осям координат, определенные как разности измеренных координат и вычисленных с учетом полученных значений параметров модели измерений;  $a_{11}, a_{12}, \dots, a_{33}$  — элементы матрицы направляющих косинусов осей СК БОКЗ-М относительно осей ИСК (матрица  $\{a_{ij}\}$  задает переход от инерциальной СК к приборной).

Параметры ориентации определяются из решения переопределенной трансцендентной системы уравнений коллинеарности методом Ньютона — Рафсона по методу наименьших квадратов [см. лит., с. 86]. В рассматриваемом случае в качестве параметров ориентации использовались три угла —  $A, \delta_0, \alpha_0$ . Углы  $\delta_0, \alpha_0$  задают направление оси  $Z$  ПСК, а угол  $A$  определяет разворот осей ПСК относительно небесного меридиана.

Элементы матрицы направляющих косинусов в этом случае будут вычисляться по следующим формулам:

$$a_{11} = -\cos A \sin \alpha_0 - \sin A \cos \alpha_0 \sin \delta_0; \quad a_{21} = \sin A \sin \alpha_0 - \cos A \cos \alpha_0 \sin \delta_0;$$

$$a_{12} = \cos A \cos \alpha_0 - \sin A \sin \alpha_0 \sin \delta_0; \quad a_{22} = -\sin A \cos \alpha_0 - \cos A \sin \alpha_0 \sin \delta_0;$$

$$a_{13} = \sin A \cos \delta_0; \quad a_{23} = \cos A \cos \delta_0;$$

$$a_{31} = \cos \delta_0 \cos \alpha_0;$$

$$a_{32} = \cos \delta_0 \sin \alpha_0,$$

$$a_{33} = \sin \delta_0.$$

**Логика функционирования прибора БОКЗ-М на борту КА.** После экспонирования очередного кадра обработка строится следующим образом. Выполняется чтение ПЗС-матрицы (0,6 с) с одновременным сглаживанием низкочастотной фоновой составляющей и вычислением среднего значения освещенности и дисперсии сглаживаемого кадра.

Локализуются пространственно-связные образования — изображения групп звезд — с вычислением координат их энергетических центров, мощности и площадей. Если количе-

ство локализованных объектов больше трех, осуществляется переход к процедуре идентификации в бортовом звездном каталоге, в противном случае выдается диагностическое сообщение „Нет локализации“.

При отсутствии априорной информации об ориентации КА (режим „по“) осуществляется идентификация локализованных объектов во всех 642 секторах бортового звездного каталога (просмотр всей небесной сферы происходит примерно за 30 с); при наличии априорной информации (режим „yes“) — в конкретном секторе каталога.

В случае идентификации трех и более звезд осуществляется переход к процедуре уточнения параметров ориентации.

При отсутствии идентификации в режиме „yes“ осуществляется переход в режим „по“ и производится три экспонирования. При отсутствии идентификации выдается диагностическое сообщение „Нет распознавания“ и прибор переходит в режим ожидания.

#### ЛИТЕРАТУРА

Вычислительная математика / В. А. Вергасов, И. Г. Журкин, М. В. Красикова и др. М.: Недра, 1976.

Рекомендована институтом

Поступила в редакцию  
16.12.02 г.