

УДК 629.7.05

## **Определение ориентации КА системы мониторинга Земли посредством обработки информации от аппаратуры зондирования**

К.А. Полосухина

### **Аннотация**

Рассматривается метод построения местной вертикали с использованием информации зондирования Земли и околоземного пространства для космического аппарата (КА) глобальной системы мониторинга, функционирующего на высокоэллиптической орбите. Главное отличие предложенного метода от традиционного для космонавтики – отказ от применения в системах ориентации КА специализированных приборов для определения направления на центр Земли (т.е. построения местной вертикали).

### **Ключевые слова**

Космический аппарат; ориентация; бортовая аппаратура зондирования; статистические характеристики; оценка точности.

### **Введение**

На борту космических аппаратов (КА) системы мониторинга Земли и околоземного пространства, функционирующих на высокоэллиптических орбитах, имеется возможность для ориентации КА без использования навигационной информации от системы ГЛОНАСС или от других космических или наземных средств [1]. При этом на борту КА требуется только информация астроприборов и аппаратура зондирования Земли и околоземного пространства. Для определения ориентации КА информация зондирования подвергается дополнительной обработке.

Идея использования инфракрасного (ИК) изображения земного диска, формируемого непосредственно бортовой оптико-электронной аппаратурой зондирования, для определения

направления на центр диска и выполнения тем самым функций ИК вертикали – прибора, обычно применяемого в системах ориентации КА, – и ранее представляла интерес для разработчиков аппаратуры зондирования предыдущих космических систем мониторинга Земли. Однако её практическая реализация осложнялась, с одной стороны, ограниченным или просто малым полем обзора, в которое вмещалась малая часть видимого горизонта Земли, и, с другой стороны, высокой защищённостью аппаратуры от воздействия фона Земли, как правило, препятствующей видению ночного горизонта. Поэтому современная бортовая аппаратура зондирования, широкопольный канал которой покрывает преимущественно весь видимый с орбиты диск Земли, а сочетание пороговой чувствительности и пространственного разрешения таково, что позволяет получать сигналы не только от дневного, но и от ночного горизонта, хорошо подходит для реализации функций ИК вертикали.

### **Общий алгоритм обработки информации зондирования Земли**

В результате обработки каждого кадра, полученного от бортовой оптико-электронной аппаратуры зондирования, решаются следующие задачи [2].

*Задача 1.* В кадре размерностью  $M \times N$ , (где  $M$  – количество строк в кадре,  $N$  – количество элементов разрешения в одной строке), вырабатываемом бортовой аппаратурой зондирования, выявляются элементы разрешения  $j, I_1$  и  $j, I_2$ , соответствующие точкам контура наблюдаемой фигуры Земли (см. рисунок 1). Координаты выявленных элементов разрешения, полученные по всем строкам развертки кадров, накапливаются и сохраняются в массив  $\{j, I_n\}$  ( $n = 1, 2$ ) размерностью  $M \times 2$ , где в первом столбце хранятся координаты левой, а во втором – правой координаты точки контура Земли для следующего этапа обработки.

*Задача 2.* С применением метода наименьших квадратов выполняется обработка массива координат  $\{j, I_n\}$  и определяются параметры наблюдаемого диска Земли: радиус среднего круга  $\rho_0$ , и координаты его центра  $j_0, i_0$ . Оценки  $\rho_0, j_0, i_0$  обеспечивают оптимальное соответствие измерений  $\{j, I_n\}$  координат границ наблюдаемого диска Земли и расчетных значений координат, получаемых с использованием оценок  $\rho_0, j_0, i_0$  (см. рисунок 1). Тем самым обеспечивается построение местной вертикали и уточняется текущая ориентация КА (точнее визирной системы координат, связанной с осями бортовой аппаратуры зондирования), относительно направления на центр Земли.

*Задача 3.* Использование информации о местной вертикали совместно с информацией от астроприборов позволяет определить текущие (измеренные) координаты КА на небесной сфере (прямое восхождение  $\alpha_k$  и склонение  $\delta_k$  на момент времени  $t_k$  привязки информации каждого кадра).

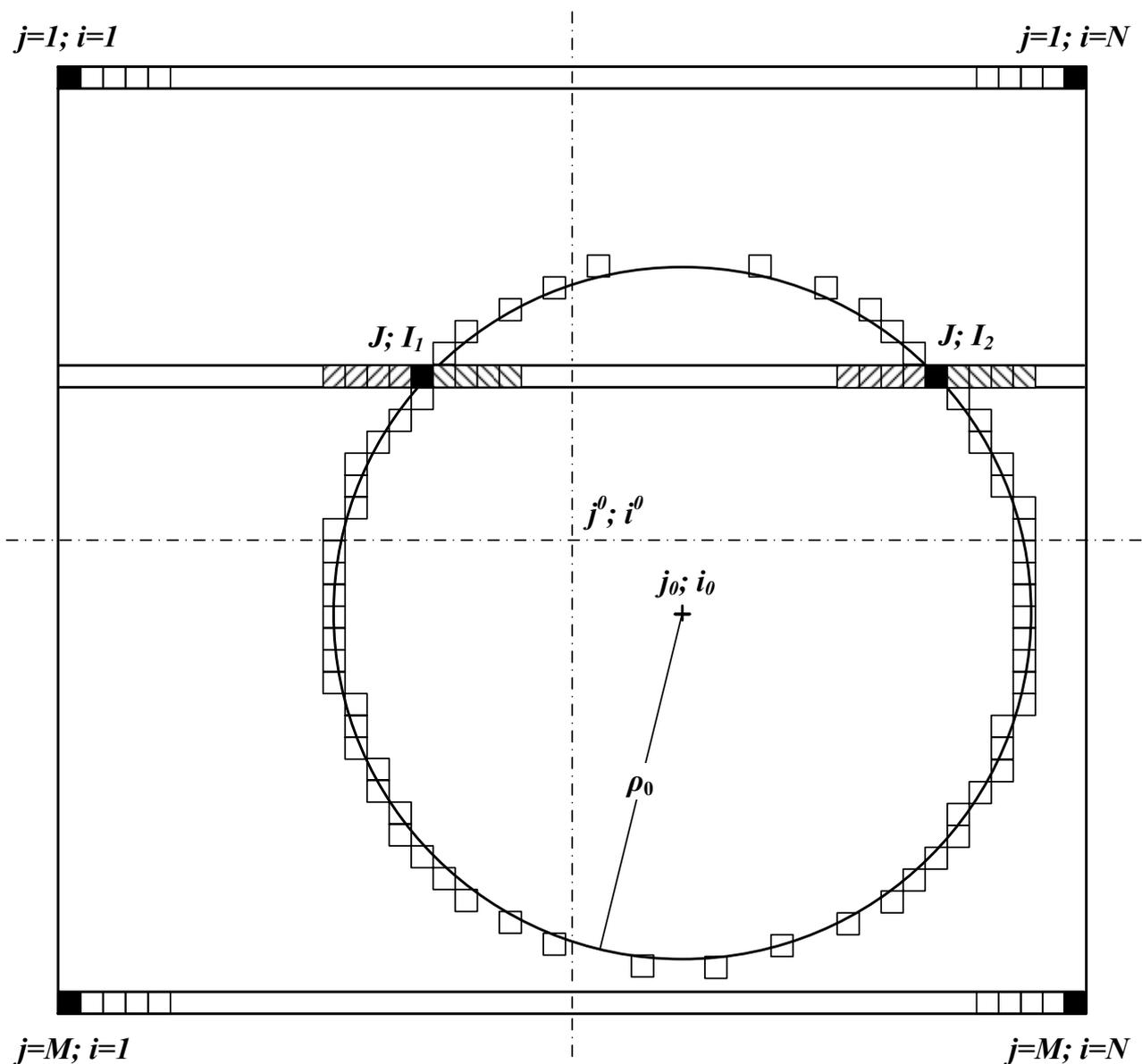


Рисунок 1. Параметры диска Земли в кадре бортовой аппаратуры зондирования

Следует обратить внимание на то, что в *Задачах* 1, 2 применяются статистические методы обработки и принятия решений, а также эти задачи являются новыми для космонавтики.

Рассмотрим подробно *Задачу* 1.

### Определение координат точек контура Земли

Бортовая оптико-электронная аппаратура зондирования создана и настроена таким образом, чтобы выделить скачки амплитуд, большинство из которых возникает при переходе сканирующего луча из космоса на поверхность Земли и обратно. Таким образом, на выходе

аппаратуры зондирования получается изображение с ярко выраженным контуром наблюдаемой фигуры Земли.

Амплитуда сигнала является случайной величиной (см. рисунок 2).

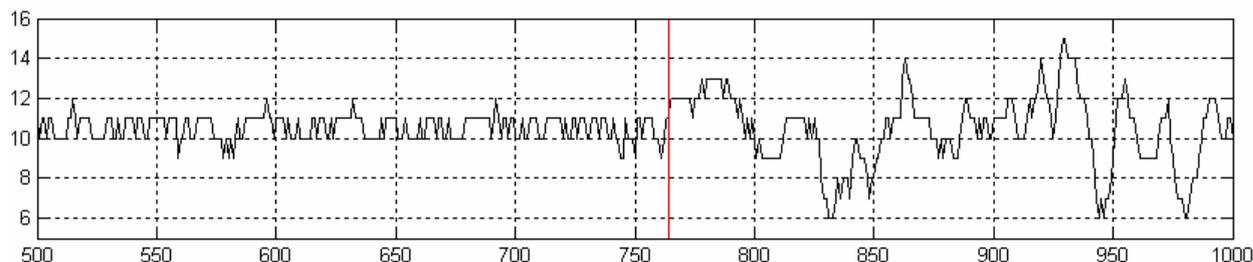


Рисунок 2. Значения сигнала  $Q(j,i)$  в  $i$ -м элементе разрешения  $j$ -й строки

Считается, что амплитуды сигналов из космоса и от поверхности Земли подчинены нормальному закону распределения. Их числовые характеристики различны:

- математическое ожидание амплитуды сигнала из космоса равно нулю, тогда как математическое ожидание от поверхности Земли больше нуля;
- среднеквадратическое отклонение амплитуды сигнала из космоса в несколько раз меньше, чем от поверхности Земли.

Эти различия используются для выявления элементов разрешения кадра с координатами  $j, I_n$  (где  $n = 1,2$ ), соответствующих левой и правой границам наблюдаемого диска Земли в поле кадра бортовой аппаратуры зондирования (см. рисунок 1).

Для определения левой границы  $j, I_1$  Земли может быть применена следующая последовательность операций.

Из множества значений  $Q(j,i)$ , полученных в  $j$ -й строке, на интервале значений  $i = \overline{I_s, I_s + L}$ , (где  $I_s$  – левая граница интервала поиска,  $L$  – длина интервала поиска) формируются в скользящем режиме пары смежных выборок длиной  $H$ . Проверяется гипотеза  $\Gamma_1$  о наличии границы наблюдаемого диска Земли в  $i$ -й точке данной строки, т.е. о соответствии левой выборки  $Q(j, I_s : I_s + H)$  участку космоса, а правой выборки  $Q(j, I_s + H + 1 : I_s + 2 \cdot H)$  – Земли. Проверка выполняется путем сравнения математических ожиданий и дисперсии пар смежных выборок. Для этого на каждом  $i$ -м шаге:

- рассчитываются суммы элементов левой  $S_1$  и правой  $S_2$  выборок;
- рассчитывается значение разницы сумм выборок  $\Delta S$ .

Если полученная разница сумм  $\Delta S$  имеет экстремальное значение на выполненном этапе обработки строки, то:

- рассчитываются моменты второго порядка левой  $D_1$  и правой  $D_2$  выборок:

- рассчитывается отношение дисперсии правой выборки к левой, если оно превышает заданное пороговое значение  $Fp$ , то координата  $i$  считается левой границей наблюдаемого диска Земли в  $j$ -й строке кадра и сохраняется в массиве  $\{j, I_1\}$ .

Для выявления границы и определения координат  $j, I_2$  правой части наблюдаемого диска Земли (см. рисунок 1) может быть применена аналогичная последовательность операций со сменой последовательности обработки элементов разрешения на обратную. При этом знак экстремальных значений разностных сумм  $\Delta_i$  также меняется на обратный.

Проверка состоятельности разработанного алгоритма решения *Задачи 1* выполнялась путем исследований с использованием реальной информации зондирования, в процессе которых определялась зависимость качества определения координат контура наблюдаемой фигуры Земли от значения длины выборок  $N$  и порогового значения  $Fp$ . Под качеством здесь понимается процентное соотношение количества координат точек контура, попавших в строб заданной длины (30 пикселей или  $\sim 40$  км), к общему количеству строк в кадре.

Из результатов исследования следует, что при оптимальных значениях варьируемых параметров вероятность верного определения границ может составлять 90-95%. Вместе с тем в аномальных условиях работы аппаратуры количество сбойных решений может достигать 60-80%.

В целом результаты исследований подтверждают возможность эффективного решения *Задачи 1* и акцентируют внимание на необходимости отработки применяемого алгоритма и настройки его параметров с учётом реальных характеристик информации, вырабатываемой бортовой аппаратурой зондирования.

### **Определение координат центра Земли**

Описанная выше *Задача 2* определения центра наблюдаемого диска Земли должна решаться в условиях возможного наличия сбойных координат границ диска. Для отсеивания сбойных координат известные процедуры методом наименьших квадратов [3] дополняются следующими расчётами:

1. Определение отклонений координат  $j, I_n$  из состава массива  $\{j, I_n\}$  от их расчётных значений  $j, I_{pn}$ , соответствующих расчётным координатам  $j^0, i^0$  центра Земли в центре ИК, и отсеивание из массива  $\{j, I_n\}$  тех координат  $j, I_n$ , для которых отклонение превышает допустимое значение (см. рисунок 1).

2. Отработка метода наименьших квадратов (см. выше *Задача 2*) с использованием оставшихся координат в массиве  $\{j, I_n\}$  и определение по критерию  $\chi^2$  [3] необходимости дополнительного отсеивания сбойных координат.

3. Выполнение дополнительного отсеивания групп сбойных координат с применением критерия Кочрена.

4. Выполнение дополнительного отсеивания отдельных сбойных координат с применением критерия Фишера [4].

Выполнение отбраковок основывается на принципе: лучше вместе с аномальными исключить из обработки несколько хороших измерений, чем оставить хотя бы одно аномальное. Допустимость этого принципа обусловлена большой избыточностью обрабатываемой информации, а именно для определения трёх параметров  $\rho_0, j_0, i_0$  в кадре аппаратуры зондирования может быть использовано до 4000 координат  $j, I_n$ .

Результаты модельных исследований, выполненных в целях проверки эффективности решения *Задачи 2*, приведены в табл. 2. Принято, что после отбраковки аномальных обрабатываемых измерений ошибки определения координат контура видимой фигуры Земли распределены по нормальному закону  $N[\sigma, m]$ , где  $\sigma = 20$  км.

Таблица 1. Результаты определения центра наблюдаемой фигуры Земли

Вар.	Условия обработки	Количество обрабатываемых измерений	СКО определения координат центра, км		СКО определения радиуса $\rho_0$ , км
			$j_0$	$i_0$	
1	Весь кадр	3486	0,4	0,5	0,32
2	Верхняя половина	1725	1,5	0,6	0,96
3	Левая половина	1736	0,9	1,6	1,48
4	Левая верхняя четверть	866	4,8	4,7	5,68
5	Весь кадр	1718	0,7	0,8	0,52
6	Весь кадр	345	1,8	1,2	1
7	Весь кадр	170	2,1	1,8	1,44

Проведенные модельные исследования демонстрируют возможность сохранения эффективности решения *Задачи 2* в условиях большого количества отсутствия или неверного определения границ наблюдаемого диска Земли.

### Заключение

Рассмотрена задача использования информации, полученной от бортовой аппаратуры зондирования, для определения ориентации высокоэллиптического КА, которая состоит из двух задач: определения координат точек контура и координат центра Земли. Разработаны

алгоритмы решения задач, проведены модельные исследования, из результатов которых следует, что:

- при оптимальных значениях варьируемых параметров алгоритма вероятность верного определения координат контура может составлять 90-95%, что подтверждает возможность эффективного решения поставленной задачи;
- ошибка определения координат центра Земли в благоприятных условиях обработки не превышает 1 км, а при неблагоприятных – 5 км.

Выбор оптимальных значений параметров алгоритма определения контура наблюдаемой фигуры Земли является сложной задачей, решение которой предстоит получить в результате совместных исследований с решением задачи определения координат центра Земли в кадре аппаратуры зондирования.

Высокая точность и надёжность определения ориентации КА достигается за счёт применения оптимальных статистических методов обработки большого объёма информации и её контроля.

Учитывая новизну и сложность решаемых задач при создании бортового комплекса обеспечения определения ориентации КА следует предусмотреть его отработку в наземных условиях по реальной информации аппаратуры зондирования, полученной на борту КА.

### **Библиографический список**

[1] Денисов К.И., Бабилов С.М., Гапон В.А., Литовченко Д.Ц., Литовченко Ц.Г., Мисник В.П., Яковенко Ю.П. Способ ориентации и автономной навигации комического аппарата системы мониторинга Земли и околоземного пространства. Патент на изобретение по заявке №2008140349/11 (052223) от 10.10.2008г., ФИПС Роспатент, 2009.

[2] Денисов К.И. Автономная навигация космического аппарата системы мониторинга Земли и околоземного пространства. Вып. 2. – М.: ФГУП «ЦНИИ «Комета», 2008.

[3] Вентцель Е.С. Теория вероятностей. М.: Издательский центр «Академия», 2003.

[4] Худсон Д. Статистика для физиков. М: «Мир», 1970.

### **Сведения об авторе**

Полосухина Кристина Анатольевна, инженер-исследователь ФГУП «ЦНИИ «Комета», kristy-p@mail.ru, 8 (926) 306 7384.

125239, г. Москва, 3-й Михалковский пер., д. 16, корп. 1, кв. 74.