

Маштаков Я. В., Ткачѐв С. С.

СИНТЕЗ УГЛОВОГО ДВИЖЕНИЯ СПУТНИКА ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ПРИ ОТСЛЕЖИВАНИИ МАРШРУТОВ НА ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ

В настоящее время с помощью дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) средствами космических аппаратов (КА) решается широкий спектр задач. Среди них: мониторинг состояния окружающей среды, прогнозирование лесных пожаров, прогнозирование погоды. При этом для дистанционного зондирования могут использоваться различные типы датчиков, устанавливаемых на КА: микроволновые, радарные, оптические и другие.

Важной прикладной задачей оказывается отслеживание различных маршрутов на поверхности Земли с помощью специальных камер, которые устанавливаются на КА. Сама камера представляет собой устройство, состоящее, помимо прочего, из линзы и чувствительного элемента. В качестве такого элемента могут использоваться:

1) ПЗС-матрицы, в которых изображение, проходя через линзу и падая на матрицу, должно оставаться неподвижным в течение определённого промежутка времени;

2) ПЗС-линейки, представляющие собой набор параллельных линий, при использовании которых накладывается ограничение на так называемую скорость бега изображения: проходя через линзу и падая на чувствительный элемент, изображение снимаемой области должно проходить через эти линии с постоянной скоростью и перпендикулярно к ним.

Для обеспечения требуемого движения изображения относительно чувствительного элемента необходимо построить угловое движение КА, то есть определить его ориентацию, угловую скорость и ускорение как функции времени.

В случае использования ПЗС-матрицы снимаемая траектория разбивается на участки малой протяжённости. При этом на каждом участке выбирается точка, на которую должна быть направлена камера, и фиксируется некоторое направление, что исключает смещение изображения в фокальной плоскости камеры. После этого, последовательно снимая каждый из отрезков, можно получить изображение всей траектории. Задача, таким образом, решается в несколько этапов:

1) разбиение траектории на малые участки;

2) выбор на каждом участке точки \mathbf{P} и направления $\boldsymbol{\tau}$ (в работе такой точкой является середина малого участка, а направлением — касательная к траектории в данной точке);

3) для каждой такой пары (точки и направления) строится необходимое угловое движение спутника, а также управление, реализующее его.

В работе рассматривается только последний пункт, т.е. построение углового движения КА в случае отслеживания заданной точки и направления.

Угловое движение синтезируется с помощью кинематических соотношений Пуассона:

$$\dot{\mathbf{B}} = \mathbf{W}\mathbf{B}, \quad \mathbf{B} = \begin{pmatrix} \mathbf{e}_1^T \\ \mathbf{e}_2^T \\ \mathbf{e}_3^T \end{pmatrix}, \quad \dot{\mathbf{B}} = \begin{pmatrix} \dot{\mathbf{e}}_1^T \\ \dot{\mathbf{e}}_2^T \\ \dot{\mathbf{e}}_3^T \end{pmatrix}, \quad \mathbf{W} = \begin{pmatrix} 0 & \omega_3 & -\omega_2 \\ -\omega_3 & 0 & \omega_1 \\ \omega_2 & -\omega_1 & 0 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где \mathbf{B} есть матрица направляющих косинусов, связывающая инерциальную (ИСК) и связанную со спутником (ССК) системы координат. Таким образом, задав базисные векторы ССК как функции времени, можно найти значения угловых скоростей спутника. Продифференцировав уравнения Пуассона по времени, можно получить уравнения для угловых ускорений спутника:

$$\dot{\mathbf{W}} = \dot{\mathbf{B}}\dot{\mathbf{B}}^T + \ddot{\mathbf{B}}\mathbf{B}^T. \quad (2)$$

Как следует из требований, накладываемых ПЗС-матрицей, базисные вектора \mathbf{e}_i ССК можно выбрать следующим образом:

- 1) в качестве \mathbf{e}_1 рассматривается вектор единичной длины, параллельный вектору $\boldsymbol{\rho}$, соединяющему центр масс спутника и точку наблюдения;
- 2) в качестве \mathbf{e}_2 используется нормированная составляющая вектора $\boldsymbol{\tau}$, перпендикулярная \mathbf{e}_1 ;
- 3) \mathbf{e}_3 дополняет систему до правой ортогональной системы координат.

Формульные выражения для базисных векторов имеют вид:

$$\mathbf{e}_1 = \frac{\boldsymbol{\rho}}{\|\boldsymbol{\rho}\|}, \quad \mathbf{e}_2 = \frac{\boldsymbol{\tau} - \mathbf{e}_1(\mathbf{e}_1, \boldsymbol{\tau})}{\|\boldsymbol{\tau} - \mathbf{e}_1(\mathbf{e}_1, \boldsymbol{\tau})\|}, \quad \mathbf{e}_3 = \mathbf{e}_1 \times \mathbf{e}_2.$$

Два раза дифференцируя эти выражения по времени и подставляя их в (1) и (2), можно получить необходимое угловое движение спутника.

В случае использования ПЗС-матриц на отслеживаемую траекторию накладывается дополнительное ограничение: она должна представлять собой дважды непрерывно дифференцируемую функцию одного параметра. Угловое движение строится таким же способом, как и для ПЗС-матриц, однако базисные векторы теперь определяются несколько иначе:

- 1) в качестве \mathbf{e}_1 рассматривается вектор единичной длины, параллельный вектору $\boldsymbol{\rho}$, соединяющему центр масс КА и точку наблюдения;

2) в качестве \mathbf{e}_2 используется нормированная составляющая вектора касательной к траектории в точке визирования $\boldsymbol{\tau}$, перпендикулярная \mathbf{e}_1 ;

3) \mathbf{e}_3 дополняет систему до правой ортогональной системы координат.

Формульные выражения для базисных векторов:

$$\begin{aligned}\mathbf{e}_1 &= \frac{\mathbf{r}_p - \mathbf{r}_s}{\|\mathbf{r}_p - \mathbf{r}_s\|} = \frac{\boldsymbol{\rho}}{\rho}, \quad \mathbf{r}_p = \mathbf{r}_p(t, s(t)), \\ \mathbf{e}_2 &= \frac{\boldsymbol{\tau} - \mathbf{e}_1(\boldsymbol{\tau}, \mathbf{e}_1)}{\|\boldsymbol{\tau} - \mathbf{e}_1(\boldsymbol{\tau}, \mathbf{e}_1)\|}, \quad \boldsymbol{\tau} = \frac{\partial \mathbf{r}_p}{\partial s}, \\ \mathbf{e}_3 &= \mathbf{e}_1 \times \mathbf{e}_2.\end{aligned}\tag{3}$$

где \mathbf{r}_p есть радиус-вектор некоторой точки маршрута. Отличие от случая ПЗС-матрицы состоит в том, что положение точки визирования зависит не только от времени (т.к. Земля вращается), но и от параметра $s(t)$, который определяет положение точки на траектории.

При этом полная производная \mathbf{r}_p по времени определяется выражением

$$\frac{d\mathbf{r}_p}{dt} = \boldsymbol{\Omega}_E \times \mathbf{r}_p + \frac{\partial \mathbf{r}_p}{\partial s} \dot{s}.$$

После этого, учитывая (1) и используя ограничения, которые накладывает на угловую скорость спутника ПЗС-матрица, можно получить дифференциальное уравнение на параметр траектории s :

$$\dot{s} = \frac{\rho V}{f} \frac{1}{(\boldsymbol{\tau}, \mathbf{e}_2)},$$

где V есть требуемая скорость бега изображения, f — расстояние от линзы до фокальной плоскости камеры. Решая его и подставляя получившуюся функцию в (3), можно получить значения базисных векторов как функции времени. После этого с использованием уравнений Пуассона (1) получаем искомое угловое движение спутника.

Работа поддержана грантами РФФИ (№ 12-01-33045, № 13-01-00665).

Библиографический список

- 1 Бутырин С.А. Кинематический синтез программного углового движения космического аппарата при оптико-электронной съемке земли // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2007. Т. 9. № 3. С. 664–670.
- 2 Бутырин С.А. Программный комплекс для расчета и визуализации маршрутов оптико-электронной съемки Земли // Вестник Самарского государственного технического университета. 2007. Т. 2. С. 11–17.

- 3 Бранец В.Н., Шмыглевский И.П. Применение кватернионов в задачах ориентации твердого тела. М.: Издательство «Наука», 1973.
- 4 Маштаков Я.В., Ткачев С.С. Построение углового движения спутника ДЗЗ при отслеживании маршрутов на поверхности Земли. [Электронный ресурс] // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. [Офиц. сайт]. URL: http://www.keldysh.ru/papers/2014/prep2014_20.pdf