

УДК 629.7.05

Канд. техн. наук А.Л. Макаров, канд. техн. наук А.Г. Меланченко,
канд. техн. наук И.А. Пятак, д-р техн. наук В.С. Хорошилов

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТОЧНОСТИ ГЕОГРАФИЧЕСКОЙ ПРИВЯЗКИ ЭЛЕМЕНТОВ КОСМИЧЕСКОГО СНИМКА

Выработан подход, позволяющий ограничить перечень факторов, влияющих на погрешность привязки, только погрешностями сканера и астросистемы. Эффективность подхода подтверждается результатами обработки снимка, полученного КА "Сич-2".

Вироблено підхід, що дає змогу обмежити перелік факторів, що впливають на похибку прив'язки, тільки похибками сканера та астросистеми. Ефективність підходу підтверджується результатами оброблення знімка, одержаного КА "Січ-2".

An approach on restriction of enumeration of factors, affecting georeferencing errors by errors of scanner and star sensor only, is developed. Effectiveness of this approach is confirmed by results of processing of image delivered by "Sich-2" SC.

Постановка проблемы

Интерпретация спутниковых снимков подстилающей поверхности требует знания географических координат точек получаемого изображения. Процедура определения координат точек поверхности формулируется как решение задачи географической привязки.

Изображение формируется по данным установленной на борту оптико-электронной системы (сканера), его обработка может проводиться с учетом ориентации КА. Данные об ориентации выдает система определения ориентации, построенная на основе астроизмерительной системы (АИС).

Рассматриваются следующие две задачи:

- построение способа (алгоритма) и математического аппарата определения координат точек снимка;
- достижение максимально возможной точности определения координат.

Обзор публикаций

ДСТУ 4758:2007 [1] предусматривает два уровня (способа) привязки данных:

- уровень 1 – на основании данных об угловом положении КА и установленного на нем сканера относительно Земли (элементов внешнего ориентирования), а также координат КА вычисляются земные координаты точки пересечения с земной по-

верхностью вектора снимка, построенного сканером;

- уровень 2 – при наличии на снимке точек с известными географическими координатами координаты произвольных точек изображения определяются путем интерполяции в поле снимка.

Как видно, реализация привязки по уровню 2 обеспечивается только для снимков с различимыми на них опорными точками (маяками, реперами), что не всегда возможно. С другой стороны, на точность привязки по уровню 1 влияют дополнительные погрешности: определения ориентации КА, взаимного положения осей сканера и астросистемы, координат КА и др. Как результат, точность решения по этому уровню оказывается ниже, чем по уровню 2.

Однако решение по внешнему ориентированию обладает существенным преимуществом, заключающимся в гарантированной возможности выполнения привязки любого снимка вне зависимости от наличия на нем реперов. Кроме того, входящая в обработку по уровню 2 операция опознавания реперов сложна и не исключает получения недостоверного решения. Поэтому является актуальным развитие методов высокоточной привязки по внешнему ориентированию. Так, по литературным данным, для российского КА "Ресурс-П" поставлена задача "обеспечения привязки без опорных точек с использованием бортовых измере-

ний на уровне среднеквадратического отклонения (с.к.о) не более 10 – 15 м" [2].

Задача исследования

Перед настоящей работой поставлены следующие цели:

- на основании исследования алгоритмов географической привязки по элементам внешнего ориентирования выявить факторы, участвующие в формировании погрешности привязки;

- разработать методы алгоритмической компенсации влияния факторов погрешностей с целью достижения максимальной точности привязки.

Изложение основного материала

Привязка выполняется путем вычисления последовательности переходов от системы координат сканера к системе координат местности. Решение поставленной задачи основывается на оптимизации цепочки переходов между рядом координатных систем, связанных с разными элементами конструкции КА и их отдельными блоками, и уточнении параметров операторов переходов. Выбор базовых систем координат (СК) оказывает определенное влияние на точность решения. Ниже приводится перечень используемых ортогональных СК с указанием их индекса в формульных выражениях:

- абсолютная (АСК), совпадающая со 2-й экваториальной СК, с началом в центре Земли (а);

- географическая (ГСК) с началом в центре Земли (совпадает с 1-й экваториальной СК) (g);

- геодезическая СК, связанная с нормалью к поверхности общеземного эллипсоида (модель WGS-84);

- орбитальная (ОСК) с началом в центре масс КА; оси ее связаны с плоскостью оскулирующей орбиты и радиусом-вектором КА-центр Земли (о);

- связанная (ССК) с началом в центре масс КА; оси ее связаны с конструкцией КА (с);

- связанная с контрольным оптическим элементом (КОЭ), установленным на корпусе АИС. Контрольный оптический элемент предназначен для определения оптическими методами фактического направле-

- ния конструкторских осей АИС относительно ССК после его установки на КА (k);
- связанная с фотоприемной структурой АИС (p);

- связанная с КОЭ, установленным на корпусе сканера (s);

- связанная с фотоприемной структурой сканера (f).

Переходы от одной системы координат к другой определяются матрицами вида M_{21} , где 1, 2 – числовые или буквенные индексы исходной и результирующей СК.

Сканер проводит съемку путем проектирования изображения подстилающей поверхности на строку (линейку светочувствительных элементов), расположенную перпендикулярно направлению полета. В процессе перемещения строки при движении КА по орбите происходит формирование кадра прямоугольной формы.

Положение визируемой точки в поле полученного кадра характеризуется двумя координатами: x , отсчитываемой справа налево, и y , отсчитываемой сверху вниз.

Координата x определяется номером пикселя n_p на линейке сканера. На КА "Січ-2" линейка включает 6000 пикселей, обеспечивая фиксацию направления на точку подстилающей поверхности при развороте вектора визирования на угол α_m в пределах 4° , начиная с $\alpha_0 = -2^\circ$. Соответствие между номером пикселя и углом α_m в общем случае задается законом $\alpha_m = F(n_p)$.

Координата y соответствует перемещению КА в ходе орбитального движения и определяется интервалом времени t от начала съемки (верхней строки).

Вектор r_f в СК фотоприемника сканера определяется как

$$r_f = \begin{pmatrix} 0 \\ \sin(\alpha_m - \alpha_0) \\ -\cos(\alpha_m - \alpha_0) \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Определяется вектор координат визируемой точки в ГСК

$$\mathbf{r}_g = L(\mathbf{r}_o). \quad (2)$$

Здесь \mathbf{r}_o – вектор координат визируемой точки в ОСК;

L – оператор (алгоритм) географической привязки вектора визирования, заданного в ОСК [3]. Оператор L вычисляется с учетом координат КА на момент t .

Значение вектора визирования в ОСК определяется выражением

$$\mathbf{r}_o = \mathbf{M}_{oa} \cdot \mathbf{M}_{ak} \cdot \mathbf{M}_{kp} \cdot \mathbf{M}_{pc} \cdot \mathbf{M}_{cs} \cdot \mathbf{M}_{sf} \cdot \mathbf{r}_f. \quad (3)$$

Результирующая погрешность элементов искомого вектора координат может быть представлена в виде суммы погрешностей, создаваемых каждым сомножителем в выражениях (2), (3). Далее рассматриваются возможность и направления улучшения привязки путем повышения точности отдельных составляющих в этих выражениях.

Погрешность от оператора L (2) и матрицы \mathbf{M}_{oa} определяется точностью задания координат КА, составляющей от единиц до 10-20 м (при использовании данных от навигационных спутников).

Погрешность от матрицы \mathbf{M}_{ak} определяется точностью измерения углового положения КА по данным АИС. По опыту работы с КА "Січ-2" ее значение не превышает 20"; в перспективе с учетом дальнейшего совершенствования прибора она может быть уменьшена в разы. При съемке с высоты 600 км такое угловое отклонение приводит к погрешности привязки в надире порядка 58 м.

В выражении (3) группа матриц $\mathbf{M}_{kp}, \mathbf{M}_{pc}, \mathbf{M}_{cs}, \mathbf{M}_{sf}$ описывает переходы между посадочными плоскостями АИС, сканера и их фотоприемными структурами. Они строятся по результатам оптических измерений на предприятиях-изготовителях. Погрешность каждого из этих измерений также может достигать 20". Кроме того, не исключается изменение углов взаимного положения приборов в процессе выведения на орбиту и полета КА.

Таким образом, источники погрешностей в выражениях (2), (3) могут быть разделены на две группы:

– погрешности от оператора $F(n_p)$, как и от АИС, которые определяются выбором приборов с приемлемой точностью;

– погрешности, связанные с переходами между различными координатными системами.

На рис. 1 представлен участок географической карты снимаемой местности (окрестности пос. Витино), на рис. 2 – космический снимок этой местности с выделенными реперами и заданными значениями их точных геодезических координат. На карте и снимке видны объекты: в левом нижнем углу – морская поверхность, в правом нижнем углу – озеро Соленое, слева от пос. Витино – лиман. На снимке рис. 2 окружностями выделены районы группирования опорных точек (в основном это конструкции радиоантенн). Расположенный рядом текст содержит данные о геодезических координатах опорных точек.



Рис. 1. Географическая карта участка съемки



Рис. 2. Космический снимок, поступивший в обработку

Для N реперов, выделенных на снимке, вычисляются векторы их направляющих косинусов в ГСК ρ_i , $i = 1, \dots, N$. С рис. 2 снимаются параметры визируемых векторов в поле снимка: $n_{\rho_i} = x_i$; $t_i = \varphi(y_i)$ (номер пикселя и время). Здесь φ – оператор масштаба шкалы времени по оси y поля снимка.

Таким образом, визирование точек с известными координатами позволило улучшить согласование измерений астросистемы и сканера и построить корректирующий оператор, повышающий точность географической привязки. Увеличивая количество реперов и используемых полигонов, влияние погрешностей взаимной установки приборов можно довести до достаточно низкого уровня. Это позволит обеспечить соответствие точности привязки точностям астросистемы и сканера.

Выводы

В результате выполненной работы можно сделать следующие выводы.

1. Проведение географической привязки по элементам внешнего ориентирования

КА (уровень 1) позволяет решить задачу для любой местности независимо от наличия на ней объектов с известными координатами.

2. Погрешность привязки зависит от точностных характеристик приборов и точности взаимной выставки приборных систем координат.

3. Вторым источником оказывает основное влияние на точность; оно может быть существенно снижено путем построения корректирующего оператора на основании наблюдения местностей с объектами с известными координатами (полигонов).

4. В настоящее время в Украине имеется полигон (район Евпатории), пригодный для решения такой задачи.

5. Применение предложенного подхода позволяет в пределе сделать основным фактором точности только погрешности астросистемы и сканера, т.е. достичь максимально возможной точности привязки.

Список использованной литературы

1. Дистанційне зондування Землі з космосу. Оброблення даних. Терміни та визначення понять: ДСТУ 4758:2007. – К.: Держспоживстандарт України, 2007. – (Національний стандарт України).

2. Черный И. Роль спутников ДЗЗ ракет // Новости космонавтики. – 2011. – Т. 21. – № 1. – С. 45.

3. Пятак И.А. Задачи координатной привязки снимков, выполненных КА // Вестн. ДНУ по ракетно-космической технике. – Т. 19, № 4, вып. 14. – 2011. – С. 116-122.

4. Зеельк Я.И. и др. Создание контрольно-калибровочного полигона подспутниковой поддержки / Я.И. Зеельк, В.А. Яценко, В.Е. Набивач, О.В. Семенов, Л.В. Подгородецкая // 13-а Укр. конф. з космічних досліджень. 2-6 вер. 2013 р.; Програма конференції. – ІКД НАНУ та ДКАУ, НЦУ ВКЗ ДКАУ, 2013. – С. 189.

5. Пятак И.А. Выбор принципов координатной привязки космических снимков // Космическая техника. Ракетное вооружение: Сб. науч.-техн. ст. – Днепропетровск: ГП "КБ Южное", 2010. – Вып. 2. – С. 100-107.

Статья поступила 30.01.2014