

doi: <https://doi.org/10.15407/knit2018.03.069>

УДК 629.7.05

А. И. Ткаченко

Международный научно-учебный центр информационных технологий и систем Национальной академии наук Украины и Министерства образования и науки Украины, Киев, Украина

ДВА АЛГОРИТМА ПРИВЯЗКИ НАЗЕМНЫХ ОБЪЕКТОВ ПО КОСМИЧЕСКИМ СНИМКАМ

Рассматриваются два принципиально различных алгоритма координатной привязки наземных объектов по космическим снимкам. Привязка включает полетный этап — съемку объектов привязки с орбиты — и наземный этап — обработку снимков, переданных на землю вместе с синхронно полученными показаниями звездного датчика и аппаратуры потребителя GPS. Считается, что предполагаемое местонахождение объекта привязки известно с точностью порядка 1...2 км или сотен метров. Это позволяет наводить оптическую ось камеры на окрестность объекта привязки так, чтобы обеспечить захват этого объекта полем зрения камеры и привязку с точностью порядка десятков метров. В отличие от других алгоритмов, представленные здесь алгоритмы координатной привязки не предусматривают использования эллипсоида, аппроксимирующего форму Земли, и следовательно, свободны от неудобств, связанными с возможными локальными неточностями такой аппроксимации.

Ключевые слова: космический аппарат, координатная привязка, звездный датчик, камера, объект привязки.

Координатная привязка неизвестного точечного наземного объекта (объекта привязки) рассматривается здесь как определение координат этого объекта в базисе, связанном с Землей, по результатам съемки с борта космического аппарата (КА) с привлечением показаний бортового звездного датчика и аппаратуры потребителя GPS. Искомые координаты объекта привязки рассчитываются путем обработки первичной информации, включающей изображение объекта на снимке, с помощью соответствующих алгоритмов [2, 4, 5]. Привязка включает полетный этап — съемку объектов привязки с орбиты — и наземный этап — обработку снимков, переданных на землю вместе с синхронно полученными показани-

ями звездного датчика и аппаратуры потребителя GPS. Конкретнее, считаем, что предполагаемое местонахождение объекта привязки известно с точностью порядка 1...2 км или сотен метров. Это позволяет наводить оптическую ось камеры на окрестность объекта привязки так, чтобы обеспечить захват этого объекта полем зрения камеры и привязку с точностью порядка десятков метров.

Цель настоящей работы — обоснование и сравнительное исследование двух алгоритмов решения охарактеризованной выше задачи координатной привязки, существенно различных по принципам построения и структуре. Надлежит также определить тактику съемок и обработки снимков при реализации этих алгоритмов.

© А. И. ТКАЧЕНКО, 2018

Пусть объект привязки M в момент его съемки камерой низкоорбитального КА находится на трассе полета или вблизи нее. Синхронно с моментами экспонирования t_i поступает информация от звездного датчика и GPS. Введем ортонормированные координатные базисы: базис \mathbf{K} , связанный с камерой, с началом в ее центре проекции — точке O ; базис \mathbf{E} , связанный со звездным датчиком, условно с тем же началом; базис \mathbf{J} , геоцентрический, произвольным образом связанный с Землей. Представления трехмерных векторов в каком-либо из базисов отмечаем соответствующими нижними индексами. Символом вида \mathbf{C}_{QP} обозначается матрица преобразования вектора из ортонормированного базиса \mathbf{P} в ортонормированный базис \mathbf{Q} . Таким образом, $\mathbf{C}_{JK} = \mathbf{C}_{JE} \mathbf{C}_{EK}$. Матрица \mathbf{C}_{EK} оценивается и уточняется с помощью процедуры полетной геометрической калибровки, описанной, например, в нашей работе [6]. Матрица \mathbf{C}_{JE} рассчитывается по показаниям звездного датчика и бортового хронометра. Представление геоцентрического радиуса-вектора точки M в базисе \mathbf{J} обозначим $\mathbf{r}_J = \text{const}$; O_i — положение точки O в момент t_i ; \mathbf{R}_{iJ} — геоцентрический радиус-вектор точки O_i , найденный с помощью GPS. Направление MO_i воспроизводится путем нахождения соответствующего единичного вектора \mathbf{e}_{iK} по снимку, выполненному в момент t_i , и преобразования

$$\mathbf{e}_{iJ} = \mathbf{C}_{JK} \mathbf{e}_{iK}. \quad (1)$$

Необходимо составить алгоритм преобразования показаний перечисленной выше аппаратуры в оценку координат вектора \mathbf{r}_J с точностью порядка десятков метров.

Фотограмметрическое условие коллинеарности [3] в рассматриваемой ситуации означает, что векторы \mathbf{e}_{iJ} и $\mathbf{r}_J - \mathbf{R}_{iJ}$ коллинеарны. Отсюда

$$\mathbf{e}_{iJ} \times \mathbf{r}_J = \mathbf{e}_{iJ} \times \mathbf{r}_J - \mathbf{R}_{iJ}. \quad (2)$$

Это уравнение измерений метода координатной привязки, основанного на фотограмметрическом условии коллинеарности. Формально это трансформация алгоритма координатной привязки из [5]. Само по себе отдельное уравне-

ние (2) дает возможность оценить \mathbf{r}_J с точностью до составляющей, коллинеарной \mathbf{e}_{iJ} . Решение системы не менее чем двух уравнений (2), полученной из последовательности снимков с неколлинеарными векторами \mathbf{e}_{iJ} , может обеспечить приемлемую точность оценивания координат объекта привязки.

Используем представление $\mathbf{e}_{iJ} = [e_1, e_2, e_3]^T$ (индекс T — символ транспонирования). В условной ситуации, когда базисы \mathbf{K} и \mathbf{J} совмещены или близки, координата e_3 вектора \mathbf{e}_i близка к проекции этого вектора на оптическую ось камеры. По окончании полетной геометрической калибровки вместо вектора \mathbf{e}_{iJ} доступна и учитывается в (2) его аппроксимация $\mathbf{e}'_{iJ} \approx \mathbf{e}_{iJ} + \delta \mathbf{e}_{iJ}$, где $\delta \mathbf{e}_{iJ} \approx \boldsymbol{\theta}_{iJ} \times \mathbf{e}_{iJ}$; $\boldsymbol{\theta}_{iJ} = [\theta_1, \theta_2, \theta_3]^T \in R^3$ — векторная остаточная ошибка калибровки [6].

Пусть O° — точка пересечения оптической оси камеры с земной поверхностью. Если объект привязки в момент экспонирования находится вблизи точки O° , то

$$|e_1| \ll 1, |e_2| \ll 1, e_3 \approx 1. \quad (3)$$

При этом чем больше расстояние между точками M и O° , тем больше $|e_1|$ и $|e_2|$. Ошибка в правой части уравнения (2), порожденная неточной калибровкой, оценивается выражением

$$\begin{aligned} \delta \mathbf{e}_{iJ} \times \mathbf{R}_{iJ} &\approx \\ &\approx [e_1(\theta_2 R_2 + \theta_3 R_3) - \theta_1(e_2 R_2 + R_3), \\ &e_2(\theta_1 R_1 + \theta_3 R_3) - \theta_2(e_1 R_1 + R_3), \\ &\theta_1 R_1 + \theta_2 R_2 - \theta_3(e_1 R_1 + e_2 R_2)]^T. \end{aligned} \quad (4)$$

Из условий (3) следует, что ошибка (4) практически не зависит от θ_3 , если точка M достаточно близка к O° . Подобный факт отмечен в работе [5]. С увеличением расстояния между точками M и O° неблагоприятное влияние параметра θ_3 на ошибку (4) усиливается. Из (2) видно также, что условия съемки конкретного объекта тем благоприятнее для точности его координатной привязки, чем больше угол между первой и последней линиями визирования.

При реализации рассмотренного алгоритма координатной привязки каждому снимку конкретного объекта соответствует одно уравнение

(2). В отличие от этого, в представленном далее алгоритме, использующем одно из правил решения треугольников, снимки объекта привязки обрабатываются попарно, и из каждой пары снимков получают две оценки вектора \mathbf{r}_J . Данные, используемые при реализации этого алгоритма, схематически показаны на рисунке, где O_i, O_k — положения точки O в последовательные моменты экспонирования t_i и t_k ; $\mathbf{e}_i, \mathbf{e}_k$ — соответственно единичные векторы направлений MO_i и MO_k ; \mathbf{n} — единичный вектор прямой O_iO_k ; O_E — центр Земли; $\mathbf{R}_i, \mathbf{R}_k$ — геоцентрические радиусы-векторы точек O_i и O_k ; α_i — угол между прямыми MO_i и O_iO_k ; α_k — угол между прямыми MO_k и O_iO_k ; β — угол между прямыми MO_i и MO_k ; \mathbf{r} — искомый геоцентрический радиус-вектор точки M . Обозначения, не выведенные на рисунке: b — доступная вычислению длина отрезка O_iO_k ; p_i, p_k — неизвестные длины отрезков MO_i и MO_k .

Выполним вычисления:

$$\cos \alpha_i = \mathbf{n}^T \mathbf{e}_i, \quad \cos \alpha_k = \mathbf{n}^T \mathbf{e}_k, \quad \cos \beta = \mathbf{e}_i^T \mathbf{e}_k.$$

Перейдя от найденных косинусов к положительным значениям синусов тех же углов, на основании теоремы синусов [1] найдем из треугольника MO_iO_k :

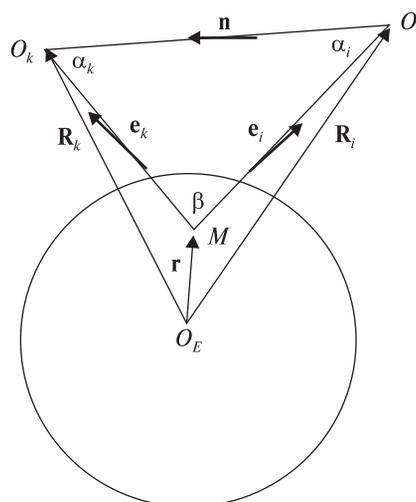
$$p_i = b \sin \alpha_k / \sin \beta, \quad p_k = b \sin \alpha_i / \sin \beta.$$

В соответствии с рисунком оценки вектора \mathbf{r}_J получаются в виде

$$\mathbf{r}_J = \mathbf{R}_{iJ} - p_i \mathbf{e}_{iJ}, \quad \mathbf{r}_J = \mathbf{R}_{kJ} - p_k \mathbf{e}_{kJ}. \quad (5)$$

Результирующая оценка вектора \mathbf{r}_J находится путем усреднения всех доступных оценок (5). С точки зрения точности привязки желательно при реализации формул (5) компоновать все пары снимков так, чтобы каждый угол β был достаточно велик.

Искажения положений модельных (вычисленных) векторов $\mathbf{e}_{iJ}, \mathbf{e}_{kJ}$ относительно \mathbf{n}_J , порожденные влиянием остаточной ошибки полетной калибровки θ_3 в преобразованиях вида (1), незначительны, если в моменты экспонирования t_i и t_k объект привязки достаточно близок к точке O° . Напротив, если хотя бы в один из этих моментов объект привязки удален от O° , и соответствующая линия визирования заметно отклонена от оптической оси камеры, упомянутые



К выводу формул (5)

искажения оказываются довольно существенными. Поэтому высказанные выше соображения о влиянии параметра θ_3 на точность координатной привязки по формулам (2) справедливы и для алгоритма (5).

Моделирование алгоритмов (2), (5) выполнялось по аналогии с тем, как это сделано в работах [5, 6]. Воспроизводилось движение КА по околокруговой солнечно-синхронной орбите высотой 670 км. Один из базисных векторов базиса \mathbf{J} был направлен по оси вращения Земли, два других находились в плоскости экватора. При $\theta_i = 0$ базисы \mathbf{E} и \mathbf{K} совмещены. Моделирование реализовалось как серия вариантов счета, в которой для формирования всех случайных величин использовался генератор последовательности псевдослучайных чисел. Задавалось размещение «неизвестных» точечных наземных объектов на участках А и В, имеющих форму квадрата со стороной соответственно 10 и 20 км и лежащих на трассе полета КА. Съемка каждого участка производилась, когда он оказывался в поле зрения камеры. На каждом из участков А и В 16 объектов привязки находятся в узлах равномерной квадратной сетки со стороной ячейки соответственно 3.3 или 6.7 км.

Таким образом, каждая из координат объектов одного участка в земном базисе образует (4×4) -матрицу. Объекты пронумерованы, как принято в языке программирования «Фортран»: сверху вниз в каждом столбце упомянутой

матрицы с непрерывным продолжением нумерации в следующем столбце. Такая конфигурация удобна для демонстрации зависимости ошибок координатной привязки от расположения объектов привязки относительно точки O° . При съемках ось чувствительности камеры наводилась на объект № 7 соответствующего участка, находящийся на пересечении второго столбца и третьей строки матрицы. Ошибки звездного датчика вводились как нормально распределенные случайные углы поворотов вокруг двух направлений, перпендикулярных к оптической оси датчика, и вокруг самой этой оси со средними квадратичными отклонениями соответственно

5", 5" и 12". Это уровень точности прибора БОКЗ-М60 при угловых скоростях рассматриваемого КА, характерных для режима наведения оптической оси камеры на неподвижный наземный объект [http://ofo.ikiweb.ru/bokz_table.php]. Размер пиксела камеры 9 мкм. Среднее квадратичное отклонение нормально распределенных случайных ошибок GPS равно 3 м [<http://izvestia.ru/news/585537>]. Имитации процесса координатной привязки предшествовала полетная калибровка системы «камера и звездный датчик», после которой средние квадратичные отклонения остаточных ошибок $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ составляли соответственно 2.7", 3.1" и 54.6".

Таблица 1. Ошибки координатной привязки по формулам (5)

Ошибка	Участок А				Участок В			
$\sigma_x, \text{ м}$	20.3	19.3	17.9	17.3	40.4	35.9	27.3	23.2
	18.2	17.4	16.3	16.0	29.6	25.2	17.3	14.3
	15.5	15.1	15.0	15.2	11.4	10.1	13.7	17.4
	15.0	14.9	15.3	15.9	12.0	14.9	22.7	27.2
$\sigma_y, \text{ м}$	13.7	11.9	15.6	19.8	14.9	16.2	19.5	21.9
	13.1	11.6	16.1	20.6	14.6	15.5	18.5	20.8
	12.1	11.5	17.2	21.9	15.1	15.0	17.1	18.9
	12.0	11.6	17.9	22.6	15.4	15.1	16.3	17.8
$\sigma_z, \text{ м}$	16.6	18.0	21.0	22.4	10.8	16.2	35.2	45.7
	13.2	14.2	16.9	18.3	10.6	12.8	30.9	41.3
	11.7	11.3	11.6	12.1	15.4	9.9	22.7	32.9
	14.1	13.0	11.8	11.8	19.1	11.5	19.0	28.7

Таблица 2. Координатная привязка с датчиком БОКЗ-МД-02

Ошибка	Участок А				Участок В			
$\sigma_x, \text{ м}$	13.3	12.0	10.0	9.0	39.4	34.7	25.9	21.6
	10.3	9.3	7.4	6.9	28.3	23.7	15.2	11.7
	6.1	5.5	5.9	6.6	8.0	6.2	11.3	15.7
	5.6	5.9	7.5	8.5	9.0	12.7	21.5	26.2
$\sigma_y, \text{ м}$	12.9	10.0	12.5	16.9	5.5	7.6	13.1	16.2
	12.1	9.5	13.0	17.7	4.8	6.1	11.6	14.6
	10.9	9.1	14.2	19.1	5.8	4.8	8.6	11.5
	10.7	9.1	15.0	19.8	6.7	4.8	7.3	10.1
$\sigma_z, \text{ м}$	13.7	15.4	18.9	20.5	9.4	15.1	34.6	45.1
	9.1	10.6	14.0	15.7	9.3	11.5	30.2	40.8
	5.5	4.9	5.8	6.8	14.7	8.4	21.9	32.3
	9.1	7.6	5.6	5.4	18.6	10.4	18.1	28.0

Реализация алгоритма (2) выполнялась с использованием двенадцати снимков каждого из участков А и В с интервалом 7 с между последовательными снимками. В процессе съемок тангаж КА изменялся от 25° при первом экспонировании до -25° при последнем. При вычислениях по формулам (5) двенадцать таких же снимков использовались попарно: каждый снимок с номером из диапазона $i = 4, \dots, 12$ сочетался поочередно с одним из снимков с номерами $k = 1, \dots, i - 3$.

По результатам 100 вариантов моделирования формировались характеристики $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ — оценки средних квадратичных отклонений ошибок вычисления координат объектов в земном базисе J . В табл. 1 представлены такие характеристики, полученные при моделировании алгоритма (5). В двух последних графах этой таблицы («Участок А» и «Участок В») представлены в матричной форме характеристики, названные в соответствующей ячейке первой графы. Видно, как с увеличением расстояния от точки O° до объекта привязки снижается точность оценивания координат объекта. Близкие по численным значениям результаты получены при моделировании алгоритма (2).

Есть основания считать, что ограниченная точность координатной привязки, показанная в табл. 1, происходит от недостаточной точности полетной калибровки, прежде всего из-за ошибок звездного датчика. С повышением точности калибровки в результате усреднения ошибок звездного датчика вследствие увеличения числа

снимков, привлекаемых для калибровки, увеличилась и точность координатной привязки.

Другой способ повышения точности полетной калибровки — использование более совершенных звездных датчиков. Результаты, представленные в табл. 2, получены в таких же условиях, как табл. 1, с тем отличием, что имитировались показания звездного датчика со средними квадратичными отклонениями ошибок 1", 1" и 20". Это предполагаемая точность звездного датчика БОКЗ-МД-02, который на момент публикации сведений из [http://ofo.ikiweb.ru/bokz_table.php] находился на стадии макетирования. Заметно существенное повышение точности координатной привязки по сравнению с табл. 1 по крайней мере для объектов, близких к узлу № 7 (точке 0°). Сокращение комплекта снимков, использованных при координатной привязке, до шести не вызвало существенного снижения точности привязки по сравнению с результатами из табл. 1 и 2.

В отличие от [2, 4], представленные здесь алгоритмы координатной привязки не предусматривают использования эллипсоида, аппроксимирующего форму Земли, и следовательно, свободны от неудобств, связанными с возможными локальными неточностями такой аппроксимации.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Бронштейн И. Н., Семедьяев К. А.* Справочник по математике для инженеров и учащихся ВТУЗов. — Изд. десятое, стереотипное. — М.: Наука, 1964. — 608 с.
2. *Лебедев Д. В.* О привязке космических снимков по орбитальным данным // Пробл. упр. и информатики. — 2016. — № 6. — С. 120—132.
3. *Лобанов А. Н.* Фотограмметрия. — М.: Недра, 1984. — 552 с.
4. *Пятак И. А.* Задачи координатной привязки снимков, выполненных КА // Вісник Дніпропетровського ун-ту. Сер. Ракетно-космічна техніка. — 2011. — Вип. 14. — С. 116—122.
5. *Ткаченко А. И.* О координатной привязке наземных объектов по космическим снимкам // Космічна наука і технологія. — 2015. — **21**, № 2. — С. 65—72.
6. *Ткаченко А. И.* Алгоритмы согласования ориентации звездного датчика и камеры космического аппарата // Пробл. упр. и информатики. — 2015. — № 3. — С. 116—126.

Стаття надійшла до редакції 25.12.17

REFERENCES

1. Bronshtejn I. N., Semendjaev K. A. Spravochnik po matematike dlja inzhenerov i uchashhihsja VTUZov. — Izd. desjatoe, stereotipnoe. 608 s. (Nauka, M., 1964).
2. Lebedev D. V. On the coordinate determination of space images by orbital data. *Problemy upravleniya i informatiki*, N 6, 120—132 (2016) [in Russian].
3. Lobanov A. N. Fotogrammetrija. 552 s. (Nedra, M., 1984).
4. Pjatak I. A. Zadachi koordinatnoj privjazki snimkov, vypolnennyh KA. *Visnik Dnipropetrovs'kogo un-tu. Ser. Raketno-kosmichna tehnika*, vip. 14, 116—122 (2011).
5. Tkachenko A. I. On a geo-referencing of terrestrial objects using space snapshots. *Kosm. nauka tehnol.*, **21** (5), 65—72 (2015) [in Russian].
6. Tkachenko A. I. Algorithms of the attitude matching of star tracker and camera of the spacecraft. *Problemy upravleniya i informatiki*, N 3, 115—136 (2015) [in Russian].

Received 25.12.17

О. І. Ткаченко

Міжнародний науково-навчальний центр інформаційних технологій та систем
Національної академії наук України
і Міністерства освіти і науки України,
Київ, Україна

ДВА АЛГОРИТМИ ПРИВ'ЯЗКИ НАЗЕМНИХ ОБ'ЄКТІВ ЗА КОСМІЧНИМИ ЗНІМКАМИ

Задача координатної прив'язки невідомих наземних об'єктів становить важливу частину дистанційного зондування Землі. Для розв'язання згаданої задачі з використанням бортової оптико-електронної системи низькоорбітального космічного апарата мають бути розроблені спеціальні схеми зйомки і обчислювальні алгоритми. Основна мета даної статті — запропонувати і дослідити такі нові алгоритми. Розглядаються два принципово відмінних алгоритми координатної прив'язки наземних об'єктів з використанням космічних знімків. Перший з цих алгоритмів ґрунтується на фотограмметричній умові колінеарності. Другий алгоритм спирається на правила розв'язання трикутників. Координатна прив'язка включає польотний етап — зйомку об'єктів з орбіти — і наземний етап — обробку знімків, переданих на землю разом із синхронно отриманими показами зоряного давача і обладнання споживача GPS. Припускається, що попередньо задане розташування об'єкта координатної прив'язки відоме з точністю порядку 1...2 км або сотень

метрів. Це дозволяє спрямувати оптичну вісь камери на окіл об'єкта координатної прив'язки таким чином, щоб забезпечити захоплення цього об'єкта полем зору камери і гарантувати координатну прив'язку з точністю порядку десятків метрів. На відміну від інших алгоритмів такого призначення, розглядуваний підхід не передбачає використання еліпсоїда, який апроксимує форму Землі, і, отже, запропоновані алгоритми вільні від непевностей, пов'язаних з можливими локальними неточностями згаданої апроксимації. Чисельне моделювання продемонструвало задовільну точність запропонованих алгоритмів координатної прив'язки у відповідності з попередньо вказаними вимогами. Можна зробити висновок, що запропоновані алгоритми можуть бути ефективно застосовані до координатної прив'язки наземних об'єктів з використанням космічних знімків.

Ключові слова: космічний апарат, координатна прив'язка, зоряний датчик, камера, об'єкт прив'язки.

A. I. Tkachenko

International Research and Training Center
for Information Technologies and Systems
of the National Academy of Sciences of Ukraine
and Ministry of Education and Science of Ukraine,
Kyiv, Ukraine

TWO ALGORITHMS FOR THE GEO-REFERENCING OF TERRESTRIAL OBJECTS USING SPACE SNAPSHOTSS

The problem of the geo-referencing of unknown terrestrial objects with use of the space snapshots is an important part of remote sensing of the Earth. For resolving the above-

mentioned problem, the onboard optical-electronic system of the low-Earth spacecraft is used as well as special imaging schemes and calculation algorithms should be elaborated. The main purpose of this paper is to propose and to study such new algorithms. We consider two fundamentally different algorithms for the geo-referencing of terrestrial objects using space snapshots. The first of these algorithms is based on the photogrammetric condition of collinearity. The second one is leant upon the rules of triangles resolution. The geo-referencing includes the flight stage as the shooting of objects from the orbit and the ground stage as the processing of images transmitted to the ground altogether with the synchronously received indications of the star tracker and the equipment of GPS customer. It is believed that the preliminarily supposed location of the geo-referencing object is known with accuracy of the order of 1 ... 2 km or hundreds of meters. This allows us to direct the camera's optical axis to the vicinity of the geo-referencing object in such a way that to be ensured that this object is captured by the field of view of the camera and the geo-referencing has accuracy of the order of tens of meters. Unlike other algorithms, our approach does not require the use of an ellipsoid that approximates the shape of the Earth, and, consequently, the proposed algorithms are free of the inconvenience associated with possible local inaccuracies of such approximation. The numerical simulation had demonstrated a satisfactory accuracy of the proposed geo-referencing algorithms in accordance with the aforesaid demands. We conclude that the proposed algorithms may be effectively applied for the geo-referencing of terrestrial objects with use of space snapshots.

Keywords: spacecraft, geo-referencing, star tracker, camera, object of geo-referencing.