

УДК 629.7.05

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

## УТОЧНЕНИЕ ВЗАИМНОГО ПОЛОЖЕНИЯ ВНУТРЕННИХ КООРДИНАТНЫХ СИСТЕМ СПУТНИКОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ В ПОЛЕТЕ

*Решается задача уточнения взаимного углового положения звездного датчика и сканера, зондирующего Землю, по данным о наблюдении наземных точек с неизвестными координатами.*

*Вирішують завдання уточнення взаємного кутового положення зоряного датчика та сканера, призначеного для зондування Землі, за даними про спостереження наземних точок з невідомими координатами.*

*The paper contains description of solving of the task of defining more accurately relative angular position of stellar sensor and Earth-sensing imager, based on data of observation of sites on the Earth with unknown coordinates.*

### Введение

Основной миссией КА дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) является получение изображения подстилающей земной поверхности в разных областях спектра. Составной частью процесса обработки снимка является определение координат его точек (географическая привязка). В соответствии с ДСТУ 4758:2007 [1] привязка уровня 1 осуществляется путем математического проектирования на подстилающую поверхность изображения, полученного оптико-электронной камерой (в данном случае – сканером), с учетом пространственного и углового положения (ориентации) КА. Ориентация КА в момент съемки обычно определяется с помощью астроизмерительной системы (АИС). Такой способ называется привязкой по элементам внешнего ориентирования.

КА, разработанные ГП "КБ "Южное", выполняли миссию ДЗЗ начиная с 80-х гг. XX века. Вопрос обеспечения точности привязки возник позже, в ходе обработки данных спутника Egyptsat (2007) и КА "Січ-2" (2010). Согласно [2] без проведения дополнительной обработки исходная погрешность привязки снимков КА "Січ-2" составляла 250...2000 м. Дальнейшие работы позволили снизить погрешность до 50...300 м. Тем не менее, такая точность оказалась недостаточно стабильной и недостаточной по зна-

чению, поскольку современные зарубежные КА осуществляют привязку с погрешностью, не превышающей единиц десятков и даже единиц метров.

### Постановка проблемы

Определяющее влияние на точность привязки оказывают погрешности следующих факторов, действующих в момент съемки:

- определение координат КА;
  - определение ориентации КА;
  - фиксация в координатах фотоприемной структуры сканера положения наблюдаемой точки;
  - рассогласование взаимного положения фотоприемных структур АИС и сканера.
- Фактическая погрешность привязки является суммой составляющих перечисленных погрешностей.

Три первых фактора и их влияние на точность predetermined выбором приборного состава КА, тогда как величина рассогласования может быть уточнена в полете.

Рассогласование координатных систем возникает вследствие неизбежных ограничений на точность выставки положений приборов при изготовлении КА, а также возможных деформаций корпуса в процессе выведения на орбиту и орби-

тального полета. Причинами деформаций являются:

- перегрузки и вибрации в процессе выведения;
- изменение остаточных деформаций после снятия перегрузок;
- тепловые деформации и т.п.

Отсюда следует, что взаимное положение координатных систем может непредсказуемо меняться во времени.

Таким образом, ставится задача повышения точности привязки путем уточнения реального рассогласования координатных систем АИС и сканера на стадии движения по орбите. Способы решения этой задачи, формулируемой как калибровка измерительного комплекса КА в полете, рассматривались, в частности, в [3, 4] как часть задачи привязки.

### Формулировка проблемы

Задача решается по данным съемки местностей, содержащих объекты с известными координатами (полигоны). Сравнивая с известными координатами расчетные координаты, полученные путем решения уравнения привязки (прямая задача), и вычисляя разности координат, можно определить искомые рассогласования через решение обратной задачи. Применение этого подхода связано с наличием базового покрытия – географической карты (электронной) наблюдаемой поверхности.

Целью настоящей работы является разработка способа уточнения рассогласования координатных систем без использования заранее подготовленного базового покрытия.

### Используемые системы координат

В качестве основных используются следующие ортогональные системы координат (СК):

- абсолютная – АСК, с началом в центре Земли, связанная с направлением в точку весны (2-я экваториальная);
- связанная – ССК, оси которой совпадают с конструкторскими (базовыми) осями корпуса КА;

орбитальная – ОСК с началом в центре масс КА, две ее оси лежат в плоскости орбиты, причем одна ось совпадает по направлению с радиусом-вектором центр Земли – КА;

географическая – ГСК, с началом в центре Земли, связанная с Гринвичским меридианом и вращающейся Землей;

эллипсоидная – ЭСК, с началом в центре Земли, связанная с Землей; оси ЭСК направлены по осям земного трехосного референц-эллипсоида;

приборная – ПСК, связанная с фотоприемной структурой на основе ПЗС линейки (прибор с зарядовой связью) сканера, формирующего изображение подстилающей поверхности;

звездная – ЗСК, связанная с фотоприемной матрицей АИС, измеряющей угловое положение осей матрицы относительно осей АСК.

При выполнении переходов от фотоприемных элементов ПСК и ЗСК к базовым осям ССК могут использоваться промежуточные СК, описывающие положение посадочных плоскостей приборов (сканера и АИС), контрольных оптических элементов (КОЭ) на корпусе прибора и др. В данной работе рассматриваются только переходы между основными СК, представляющие суммарный результат промежуточных переходов. Далее они представляются матрицами перехода  $A_{СП}$  и  $A_{СЗ}$ , номинальные значения которых задаются в числе проектных характеристик КА.

### Порядок осуществления привязки

В качестве исходных параметров для осуществления привязки наблюдаемой точки в поле снимка задаются значения следующих элементов:

- $i$  – положение точки на строке сканера (номер пикселя), фиксируемое в момент времени  $t$ ;
- $r, V$  параметры – векторы координат и скорости движения центра масс КА в ГСК на момент  $t$ .

При решении задачи выполняются следующие операции:

- пересчет координат и скорости к АСК;
- построение ОСК (вычисление положения осей ОСК относительно ГСК), результат – матрица  $A_{OG}$ ;

- измерение ориентации осей матрицы АИС относительно АСК, результат – матрица  $A_{3A}$ ;

- вычисление ориентации ССК относительно ОСК с использованием данных АИС и матрицы  $A_{C3}$ , результат – матрица  $A_{OC}$ ;

- вычисление для измеренного значения пикселя  $i$  вектора  $\rho_{II}$  направления на наблюдаемую точку в ПСК;

- вычисление вектора направления на точку в ССК с использованием матрицы  $A_{CII}$ ; результат – вектор  $\rho_C$ ;

- пересчет вектора направления на точку к ОСК с использованием матрицы  $A_{OC}$ ; результат – вектор  $\rho_O$ ;

- последовательный пересчет вектора направления на точку к ГСК и ЭСК с использованием матриц  $A_{GO}$  и  $A_{ЭГ}$ ; результат – вектор  $\rho_Э$ ;

- решение задачи определения точки пересечения вектора  $\rho_Э$  с земным эллипсоидом; результат – вектор координат  $S_Э$  в ЭСК на поверхности земного эллипсоида; оператор решения задачи обозначается как  $S_Э = L(\rho_Э)$ ;

- пересчет координат к гринвичской геоцентрической системе  $S_G = A_{ГЭ} \cdot S_Э$ .

Далее по вектору прямоугольных координат  $S_G$  вычисляются географические (или геодезические) координаты.

Таким образом, процесс наблюдения наземной точки и определение вектора  $S_G$  ее измеренных геоцентрических прямоугольных координат по вектору визирования  $\rho_\Phi$  описывается следующей последовательностью операций, выполняемых в порядке справа налево

$$S_G = A_{ГЭ} \cdot L(S_Э) \cdot A_{ЭГ} \cdot A_{ГО} \cdot A_{OC} \times A_{CII} \cdot A_{II\Phi} \cdot F(\rho_a). \quad (1)$$

На данной стадии начала процесса уточнения целесообразно группу матриц, описывающих взаимную установку АИС и сканера, объединить в единый оператор:

$$A_{O\Phi} = A_{OC} \cdot A_{CII} \cdot A_{II\Phi}. \quad (2)$$

### Уточнение с использованием базового покрытия

При проведении съемки участков подстилающей поверхности, содержащих точки с заданными известными координатами  $S_u$  и вычисления их расчетных координат  $S_p$  с применением выражения привязки вычисляются невязки  $\Delta S = S_u - S_p$ . Вычисленные невязки  $\Delta S$  могут служить показателем точности решения и являются исходным материалом для проведения уточнения параметров алгоритма обработки.

Уточнение параметров алгоритма обработки по группе невязок  $\Delta S_i, i=1,2,\dots,N$  (где  $N$  – количество реперных точек) проводится на основе выражения (1). С учетом (2) выражение в приращениях приобретает вид

$$\Delta S_G = A_{ГЭ} \cdot L(S_Э) \cdot A_{ЭГ} \times A_{ГО} \cdot \frac{\partial A_{O\Phi}}{\partial q} \cdot \delta q \cdot F(\rho_\Phi). \quad (3)$$

Здесь  $\delta q = \{\delta q_1 \quad \delta q_2 \quad \delta q_3\}^T$  – вектор угловых параметров, описывающих взаимную установку, который определяется путем обращения выражения (3).

Приведенный способ уточнения параметров реализуется при наличии снимков, выполненных над полигонами, содержащими пункты с известными координатами. Ниже излагается способ, заключающийся в искусственном создании таких точек в процессе съемки.

### Уточнение взаимной установки без использования базового покрытия

Облегчить и удешевить решение задачи калибровки можно путем применения метода неизвестных ориентиров [5, 6]. Сущность метода заключается в обработке повторных снимков, захватывающих участки одной и той же местности, и выявлении на них выделяющихся над фоном точек. Знания географических координат этих точек не требуется, координаты восстанавливаются в процессе совместной обработки нескольких (чаще всего – пары) снимков. После восстановления координат точки условно могут рассматриваться как реперы и далее использоваться для определения искомым рассогласований по уже отработанному методу [2].

Преимущества такого подхода очевидны – исключаются работы по оборудованию полигонов, и (в идеале) решение может быть получено исключительно в ходе компьютерных работ, без привлечения физических систем.

Представленный метод впервые разрабатывался применительно к обработке информации спутников системы "Океан" и был апробирован при обработке полученных изображений. При обработке данных ДЗЗ КА "Океан" этот принцип был реализован в применении к задаче определения углового положения аппаратуры КА [5]. Источником измерительных данных с этих КА для реализации метода были измерения нескольких сканеров, имеющих различную геометрию сканирования.

Применительно к КА "Сич-2М" подобный метод может быть использован в режиме стереосъемки. В работе [7] принцип называется "определение элементов внешнего ориентирования стереопар". Разновременные наблюдения одного и того же участка можно также получить: в многоспектральном сканере, при отсутствии сведения лучей; при съемке на соседних витках; при съемке на восходящем и нисходящем витках (через половину суток) либо на двух последовательных сутках и т.п.

Работа алгоритма основана на использовании выражения (1).

Измерение представляет собой результат реального физического процесса наблюдения в момент  $t_1$  точки на земной поверхности вектором визирования  $\rho_{П1}$ . С помощью выражения (1) путем подстановки в него расчетных значений входящих параметров (в том числе – в первом приближении определяемых параметров) определяется вектор расчетных координат точки  $S_r$ . Эта же точка на другом снимке на момент  $t_2$  представляется вектором визирования  $\rho_{П2}$ . Обращая выражение (1), по вектору  $S_r$  на момент  $t_2$  можно построить расчетное значение вектора визирования  $\rho_{p2}$ . Образуется вектор невязки  $\Delta\rho_2 = \rho_{p2} - \rho_{П2}$ . В процессе считывания со снимков  $n$  точек составляет система из  $n$  векторных условных уравнений

$$\Delta\rho_k = W_k \cdot \Delta q, \quad k=1, n. \quad (4)$$

Здесь  $W_k = \partial\Delta\rho_k / \partial\Delta q$  – линеаризованный оператор зависимости измеряемых параметров  $\Delta\rho_2$  от определяемых параметров  $q$ ;  $n$  – количество реперных точек.

К числу определяемых в данном случае относятся углы рассогласования взаимной установки фотоприемных структур сканера и блока АИС, входящие в вектор искомым поправок  $\Delta Q$ . Учитывая то, что ожидаемое рассогласование невелико и решается задача только уточнения вектора  $Q$ , на практике допущение линеаризации оправдано.

Уравнение (4) решается статистическими методами аналогично тому, как это выполнялось по известным ориентирам (реперам) в [2]. Решение выполняется через систему нормальных уравнений способом наименьших квадратов и имеет вид

$$\Delta q = U^{-1} \cdot B, \quad (5)$$

$$\text{где } U = \sum_{k=1}^n W_k^m * W_k;$$

$$B = \sum_{k=1}^n W_k^m * \Delta V_{bk}. \quad (6)$$

### Моделирование процесса уточнения взаимной установки

Оценка применимости рассматриваемого метода проводится путем математического моделирования процесса измерений и уточнения по их данным взаимной установки АИС и сканера.

Задачи моделирования:

- подтверждение работоспособности метода;
- определение точности решения.

В качестве исходных данных задаются числовые значения реализованной орбиты КА "Сич-2" – околокруговая орбита высотой ~664 км и наклоном 98°.

Задаются значения углов ориентации: при первом визировании крен  $\varphi = -2^\circ$ ; курс  $\psi = 2^\circ$ ; при втором визировании  $\varphi = 3,2^\circ$ ;  $\psi = 2^\circ$ . Значения тангажа задавались одинаковыми по модулю для обоих визирований в пределах 2...30°, для первого визирования отрицательные, для второго – положительные. Количество измерений (парных) равно 10. Положение визируемой точки задавалось отклонением вектора визирования в пределах  $\pm 2^\circ$  в плоскости XZ ССК. К этому направлению прибавлялась случайная погрешность, ограниченная в пределах  $\pm 1'$ . Результатом решения является с.к.о. отклонения точки пересечения прогнозируемого (т.е. вычисленного с учетом калибровки) направления вектора визирования с земной поверхностью от истинного положения. Ввиду малости величины исходной погрешности измерения вычисленная погрешность решения может пропорционально пересчитываться с учетом фактической погрешности съема координаты точки на снимке. Поэтому результат решения далее воспринимается в единицах пикселей.

Результат решения представлен на графике зависимости с.к.о. погрешности привязки, обусловленной угловым рассогласованием осей АИС и сканера, от разворотов по тангажу и уточнению рассогласования методом неизвестных ориентиров.

Погрешность,  
пиксель

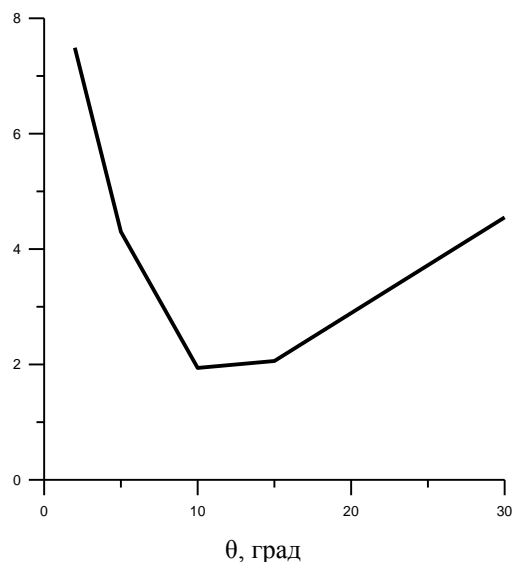


График зависимости с.к.о. погрешности привязки от разворотов по тангажу при парных наблюдениях

### Анализ результатов моделирования

По данным проведенного моделирования можно прийти к следующим выводам:

- используя повторные визирования точек с неизвестными координатами, можно определить рассогласование осей АИС и сканера;
- существуют оптимальные условия для интервала повторения визирования, позволяющие достичь наивысшей точности;
- при выполнении оптимальных условий с.к.о. рассогласования составляет ~2 пикселя.

Численные величины коэффициентов влияния основных исходных погрешностей  $\Delta$  на величину погрешности  $\Delta x$  координаты привязки при высоте орбиты 650 км и съемке в надире определяются следующими выражениями:

- определение горизонтальных координат КА  $\Delta k$  (по полету и в боковом направлении) с помощью космической навигационной системы:

$$\Delta x = R_3 / r = 0,905 \text{ м/м } (\Delta k),$$

где  $R_3$  – радиус Земли;

$r$  – радиус орбиты;

- определение углового положения КА системой АИС по тангажу или крену с погрешностью  $\Delta \alpha$ :

$$\Delta x = h \cdot \Delta \alpha = 3,08 \text{ м/(дуг. с);}$$

– цена проекции на местность пикселя сканера – 2,5 м/пиксель.

При съемке с отклонением от надира в пределах до 30° величина  $\Delta x$  возрастает, однако порядок погрешности остается прежним.

С учетом этих коэффициентов можно оценить ожидаемую величину погрешности привязки, обусловленную влиянием основных факторов – погрешностей измерений приборов и алгоритмов обработки измерений. Метрологические характеристики погрешностей измерительных данных рассматриваются близкими по порядку величины к точностям навигационного приемника, астроизмерительной системы и сканера украинского производства.

Составляющие погрешностей ( $3\sigma$ ) имеют величину: координат КА  $\Delta k = 20$  м; данных АИС  $\Delta \alpha = 5''$ ; уточнения взаимной установки АИС – сканер 15 м. Соответствующая этим данным ориентировочная оценка погрешности привязки, обусловленная основными факторами, составляет 14,5 м с уровнем надежности 0,9.

### Выводы

Разработан альтернативный метод повышения точности географической привязки наблюдаемых элементов подстилающей земной поверхности, основанный на визировании точек изображения с неизвестными координатами.

Метод обладает следующими преимуществами:

– проведение измерений для уточнения может осуществляться при съемке, заданной миссией КА, не требуя затрат на дополнительную съемку в технологических целях;

– расширяются возможности использования снимков с облачностью, поскольку на паре однородных изображений проще отождествить одинаковые детали ввиду отсутствия необходимости задания базы данных;

– значительно уменьшаются объем работ и расходы на них;

– отсутствует необходимость совмещения границ и масштаба снимка и соответствующего участка опорной мозаики, что также снижает затраты.

Дальнейшее развитие излагаемого метода предполагается выполнить в ходе обработки серии космических стереоснимков. Результаты позволят отработать технологию обработки и оценить реально достижимую точность.

### Список использованной литературы

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

2. Федоров О.П., Куцусь Н.М. та інші. Інформаційна технологія географічного прив'язування даних космічної системи ДЗЗ "Січ-2" для території України // Космічна наука і технологія. Т. 19. С. 2–12.

3. Пятак И.А. Задачи координатной привязки снимков, выполненных КА. // Вестник ДНУ по ракетно-космической технике. – Т. 19, № 4, вып. 14, Т. 1. – 2011. – С. 116–122.

4. Ткаченко А.И. Алгоритмы согласования ориентации звездного датчика и камеры космического аппарата // Проблемы управления и информатики. – 2015, № 3. – С. 116–126.

5. Пятак И.А. Выбор принципов географической привязки измерений // Исследование океана дистанционными методами. – Севастополь: МГИ, 1981. – С. 37–44.

6. 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.

7. Лобанов А.Н. Фотограмметрия. – М.: Недра, 1984. – 552 с.

Статья поступила 30.07.2015