

Моделирование процесса математической юстировки взаимной ориентации съемочной камеры и звездного датчика космического аппарата наблюдения Земли

Д.В. Лебедев¹

Аннотация – Features of modeling optic-electronic device (camera) and star sensor mutual attitude improvement (alignment) for a remote sensing satellite are discussed. The alignment is carried out in case a priori known landmarks and unknown ones.

Ключевые слова – моделирование, юстировка, съемочная камера, звездный датчик, космический аппарат, наземные ориентиры.

I. ВВЕДЕНИЕ

Использование оптико-электронной аппаратуры высокого разрешения для съемки земной поверхности из космоса требует адекватной точности топографической привязки элементов кадра. Для топопривязки необходима информация о параметрах пространственной ориентации камеры в момент съемки, рассчитанных по данным звездного датчика (ЗД) в предположении, что взаимная ориентация координатных трехгранников E и K , связанных с ЗД и камерой соответственно, известна с нужной точностью. В действительности остаточная неопределенность взаимной ориентации трехгранников E и K , имеющая место при запуске космического аппарата (КА), не только сохраняется, но и возрастает в процессе эксплуатации КА, порождая ошибку такого же порядка в определении инерциальной ориентации камеры. Если такая ошибка недопустимо велика и существенно превышает собственные ошибки ЗД, то, используя данные от камеры при наблюдении топопривязанных или априорно неизвестных наземных точечных ориентиров, данные от ЗД и GPS-приемника, реализуется процедура параметрической юстировки.

Учитывая статистическую природу ошибок, присущих упомянутым выше источникам информации, естественно использовать метод статистических испытаний для оценки точности алгоритмов юстировки. Важно отметить, что для уверенной оценки точности алгоритмов требуется большое число испытаний. Так, чтобы относительная погрешность оценки дисперсии ошибок алгоритма юстировки с вероятностью 0,9973 не превосходила 1%, необходимо проведения не менее 45 000 испытаний. В связи с этим, моделирование процесса юстировки следует организовать таким образом, чтобы искомые оценки можно было получить за разумное время.

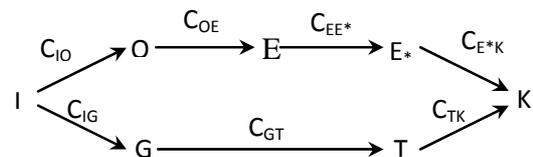
II. ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для исследования точности алгоритмов юстировки необходимо воспроизвести модельные (точные) значения

параметров, являющихся входными данными для алгоритма юстировки, и их фактические значения. координат центра масс КА и параметров его ориентации относительно системы координат, связанной с Землей, координат точечных ориентиров на плоскости изображения камеры, фактических значений этих параметров с учетом погрешностей бортовой аппаратуры и топопривязки. С целью сокращения временных затрат на получение статистических данных о точности процесса юстировки целесообразно, по-видимому, отказаться от полномасштабного моделирования управляемого движения КА.

Пусть КА наблюдения Земли движется по круговой орбите высотой H . Без ущерба для строгости считаем, что оба прибора (камера и ЗД) находятся в центре масс КА. В дополнение к трехгранникам E и K введем следующую совокупность правых ортогональных координатных трехгранников: инерциальный I , орбитальный сопровождающий трехгранник O , E^* – модельный образ трехгранника E , воспроизводимый неидеальным звездным датчиком; географический трехгранник G участвующий в суточном вращении Земли, и топоцентрический трехгранник T , вершина которого находится в точке земной поверхности с координатами λ_* , φ_* . Начала систем координат I и G совпадают с центром Земли.

Матрицу направляющих косинусов, реализующую преобразование векторов из системы координат i в систему координат j , будем обозначать через C_{ij} . Связь введенных выше координатных трехгранников иллюстрирует схема



При решении задачи юстировки искомой является матрица C_{E^*K} , при моделировании – матрица C_{TK} . Последняя вычисляется по формуле

$$C_{TK} = \begin{cases} C_{E^*K} C_{OE} C_{IO} C_{IG}^T C_{GT}^T \\ C_{EE^*} C_{OE} C_{IO} C_{IG}^T C_{GT}^T, \end{cases}$$

в которой первая строка отвечает случаю, когда используется информация от камеры (при $C_{EE^*} = E_3$, где

¹Международный научно-учебный центр информационных технологий и систем НАН и МОН, молодежи и спорта Украины, проспект Академика Глушкова, 40, Киев, ГСП, 03680, УКРАИНА, E-mail: dep180@irtc.org.ua

E_3 – единичная матрица третьего порядка), вторая – при использовании информации от звездного датчика; верхний индекс Т означает операцию транспонирования.

Принимается аппроксимация матрицы C_{E^*K} вида: $C_{E^*K} = E_3 - \Phi(\theta)$, где $\Phi(\theta)$ – кососимметрическая матрица оператора векторного умножения, $\theta = [\theta_x, \theta_y, \theta_z]^T$.

Пусть в системе координат Т задан участок земной поверхности, на котором находятся n точечных ориентиров. Если координаты этих ориентиров априорно известны, то для решения задачи юстировки достаточно одного снимка. При неизвестных ориентирах требуется не менее двух снимков, получаемых с разных точек орбиты.

Орты радиусов-векторов центра масс КА e_c и вершины трехгранника Т e_T в проекциях на оси инерциальной системы координат I находятся по формулам

$$e_c = \begin{bmatrix} \cos u \sin \Omega + \sin u \cos \Omega \cos i \\ \sin u \sin i \\ \cos u \cos \Omega - \sin u \sin \Omega \cos i \end{bmatrix}, e_T = \begin{bmatrix} \cos \varphi_* \sin \Lambda_G \\ \sin \varphi_* \\ \cos \varphi_* \cos \Lambda_G \end{bmatrix},$$

где u – аргумент широты, i – наклонение орбиты, Ω – долгота восходящего узла орбиты; $\Lambda_G = \lambda_G + \lambda_*$ (λ_G – текущее значение угла между направлением на точку весны и Гринвичским меридианом).

Из равенства $e_c = e_T$, которое выполняется в момент прохождения траектории КА через точку надира, при известных значениях углов $i, \Omega, \lambda_*, \varphi_*$ вычислим значения углов u_* и Λ_G^* . Тогда в момент времени τ , отсчитанном от точки надира, справедливы равенства

$$e_c(\tau) = \begin{bmatrix} \cos(u_* + \omega_o \tau) \sin \Omega + \sin(u_* + \omega_o \tau) \cos \Omega \cos i \\ \sin(u_* + \omega_o \tau) \sin i \\ \cos(u_* + \omega_o \tau) \cos \Omega - \sin(u_* + \omega_o \tau) \sin \Omega \cos i \end{bmatrix},$$

$$e_T(\tau) = [\cos \varphi_* \sin \Lambda, \sin \varphi_*, \cos \varphi_* \cos \Lambda]^T,$$

в которых $\Lambda = \Lambda_G^* + \omega_3 \tau$, ω_3 – угловая скорость вращения Земли, ω_o – скорость обращения КА по круговой орбите.

Приведенные соотношения позволяют сформировать вектор $\rho_{i,T}(\tau)$ взаимного положения i -го точечного ориентира и центра масс КА в проекциях на оси топоцентрической системы координат Т как вектор-функцию переменной τ :

$$\rho_{i,T}(\tau) = C_{IT} \hat{\rho}_i^*(\tau) - r_{i,T},$$

$$\hat{\rho}_i^*(\tau) = (R + H)e_c(\tau) - Re_T(\tau),$$

$$C_{IT} = C_{GT} C_{IG} = \begin{bmatrix} \cos \Lambda & 0 & -\sin \Lambda \\ -\sin \varphi_* \sin \Lambda & \cos \varphi_* & -\sin \varphi_* \cos \Lambda \\ \cos \varphi_* \sin \Lambda & \sin \varphi_* & \cos \varphi_* \cos \Lambda \end{bmatrix}.$$

Здесь введены следующие обозначения: R – радиус

Земли, $r_{i,T}$ – радиус-вектор i -го точечного ориентира в системе координат, связанной с Землей.

Приведенных данных достаточно, чтобы рассчитать модельные значения координат отображений точечных ориентиров на плоскость изображений камеры и имитировать их фактические значения с учетом погрешностей измерений. Эти данные являются входными параметрами для оценки углов $\theta_x, \theta_y, \theta_z$.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Исследование работоспособности алгоритмов и определение точности оценок координат $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ вектора θ проводились при наличии следующей системы случайных параметрических возмущений: погрешности звездного датчика; погрешности топопривязки точечных ориентиров (для случая, когда юстировка проводилась по априорно известным ориентирам); погрешности, возникающие при формировании координат центра масс КА по информации от GPS-приемника; неточности, связанные с измерением координат отображений точечных ориентиров на плоскости изображения камеры. Начальная неопределенность в значениях координат $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ моделировалась нормально распределенными числами с нулевыми математическими ожиданиями и одинаковыми дисперсиями.

При юстировке по неизвестным ориентирам использовались два снимка одного и того же участка земной поверхности с разных точек траектории КА, отвечающие моментами времени $\tau = \tau_1$ и $\tau = \tau_2$.

Математическое ожидание и среднеквадратическая погрешность оценки вектора θ отыскивались в результате обработки полученной статистической информации.

Вклад каждого из возмущающих факторов в величину среднеквадратической погрешности оценки искомых параметров характеризовался соответствующей матрицей (вектором) коэффициентов чувствительности

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Работа является развитием исследований, выполненных автором ранее, и имеет целью надежное оценивание численных характеристик остаточной неопределенности взаимной ориентации съемочной камеры и звездного датчика, имеющей место в процессе их эксплуатации на борту КА. Схема формирования взаимного положения центра масс КА и точечного ориентира и матрицы (векторы) чувствительности, отражающие влияние соответствующих возмущающих факторов на погрешность оценки углов $\theta_x, \theta_y, \theta_z$, существенно сокращают объем моделирования рассматриваемых задач.