

КАЛИБРОВКА ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА, ПРЕДНАЗНАЧЕННОГО ДЛЯ СЪЕМКИ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Введение. Рассматриваемый в этой работе космический аппарат (КА) предназначен для получения изображений земной поверхности с высот порядка 400–700 км. Для этой цели на космическом аппарате установлена жестко связанная с корпусом КА оптико-электронная система, создающая изображение по законам центральной проекции [1] и условно именуемая далее камерой.

Непременное условие успешного выполнения космическим аппаратом своего назначения — высокоточное определение ориентации камеры (собственно, связанного с камерой «приборного» трехгранника) в пространстве. Эта миссия возлагается на бортовой информационно-измерительный комплекс КА. В частности, подсистемы и блоки, входящие в информационный комплекс, определяют параметры ориентации своих приборных трехгранников относительно сопровождающего трехгранника опорной навигационной системы координат. Использование этой информации в целях управления угловым движением КА осложняется, если ориентация упомянутых приборных трехгранников относительно приборного трехгранника камеры известна не точно и к тому же может изменяться в процессе эксплуатации информационного комплекса.

Результаты настоящего исследования предназначаются для определения ориентации камеры в пространстве с точностью, позволяющей обеспечить высокое качество снимков земной поверхности. Имеется в виду не одноразовое, а систематическое определение ориентации как результат непрерывного функционирования информационного комплекса в целом.

Существенным в предлагаемой работе является использование заданных наземных точечных ориентиров. Возможность получения и применения информации о таких ориентирах при решении задач определения параметров движения объектов известна из публикаций [2–4].

В принципе, как показано ниже, имеется возможность самостоятельного определения камерой своей ориентации по наблюдениям наземных ориентиров, удовлетворяющих определенным требованиям. Таковыми скорее всего могут быть реперы искусственного происхождения, специально установленные и привязанные на местности. Препятствие к реализации этой возможности состоит в том, что появление подходящих ориентиров в кадре камеры следует рассматривать как исключительное событие и промежутки между такими событиями могут составлять несколько периодов орбитального движения. Для обеспечения надлежащей точности съемки на вышеупомянутых промежутках предлагается определять ориентацию камеры путем пересчета параметров ориентации, найденных с помощью иных бортовых информационно-измерительных устройств, таких как астроизмерительная система или бесплатформенный гироблок. Для этого необходимо в условиях, когда ориентиры с нужными свойствами доступны наблюдению, опре-

делить взаимную ориентацию приборных трехгранников камеры и других подсистем бортового информационного комплекса, в частности, астроизмерительной системы. Именно эта операция трактуется здесь как калибровка информационно-измерительного комплекса, и разработка ее алгоритмического обеспечения является целью настоящей работы, как это обозначено в заглавии. Выполнить такую калибровку можно как посредством совместной обработки информации, полученной от камеры и астроизмерительной системы, так и путем независимого определения камерой параметров своей ориентации в пространстве с последующим их преобразованием в параметры относительной ориентации камеры и астроизмерительной системы.

Определение взаимной ориентации камеры и астроизмерительной системы — предварительная постановка задачи. Без ущерба для общности в качестве опорной принимается геоцентрическая инерциальная система координат с правым ортогональным трехгранником XYZ . Ориентация этого трехгранника, например, относительно направлений на неподвижные звезды не существенна для дальнейшего, вплоть до пункта изложения, где она уточняется. Введем еще правый ортогональный орбитальный трехгранник $\xi\eta\zeta$ с вершиной S в центре проекции камеры, направив ось ζ по геоцентрической вертикали в зенит, а ось ξ — в плоскости орбиты в сторону движения КА. Свяжем с корпусом КА правый ортогональный трехгранник xuz с вершиной в точке S — приборный трехгранник камеры. Ось z направлена по оптической оси камеры в сторону, противоположную объекту съемки, а оси x и y находятся в плоскости изображения. Именно этот трехгранник надлежит ориентировать заданным образом при реализации конкретных режимов съемки. Необходимые для этого параметры ориентации трехгранника xuz относительно XYZ доступны в виде приближенных значений, подлежащих уточнению. Источником информации об этих параметрах может служить, например, установленная на КА астроизмерительная система, способная с высокой точностью определять ориентацию связанного с ней правого ортогонального трехгранника $x_1y_1z_1$. Последний в процессе измерений занимает в корпусе КА неизменное положение относительно трехгранника xuz . Поскольку конструкция и специфика функционирования астроизмерительной системы не рассматриваются, вершина трехгранника $x_1y_1z_1$ может быть отнесена к любой точке этой системы. Взаимная ориентация трехгранников xuz и $x_1y_1z_1$ задана с точностью до неизвестного вектора малой угловой ошибки. Необходимо получить оценку этой ошибки с тем, чтобы использовать ее как корректирующую поправку для определения ориентации трехгранника xuz по данным об ориентации трехгранника $x_1y_1z_1$.

Решение этой задачи, излагаемое ниже, предусматривает использование камеры в роли визирного устройства, позволяющего измерять направления на наземные ориентиры. При этом КА и его система управления должны функционировать в специальном режиме коррекции, обеспечивающем благоприятные условия для визирования ориентиров и оценки искомым параметров.

Пусть в момент времени t_* в поле зрения камеры находится несколько наземных ориентиров — точек M_k ($k = 1, 2, \dots$). Положение этих ориентиров в системе координат XYZ в момент t_* точно известно, т.е. заданы геоцентрические радиусы-векторы \mathbf{R}_k точек M_k . В результате обработки измеренных координат

точки M_k в кадре камеры бортовое вычислительное устройство находит единичный вектор \mathbf{e}_k — орт направления M_kS , представленный в системе координат xuz . Этот же орт в системе XYZ определяется выражением

$$\mathbf{i}_k = \mathbf{r}_k / \|\mathbf{r}_k\|, \quad \mathbf{r}_k = \mathbf{R} - \mathbf{R}_k, \quad (1)$$

где \mathbf{R} — геоцентрический радиус-вектор точки S , представленный в системе координат XYZ ; $\|\mathbf{r}\|$ — длина (евклидова норма) вектора \mathbf{r} .

Примем вначале, что местонахождение КА в момент t_* известно с малой ошибкой, характеризуемой вектором $\Delta\mathbf{r}$, т.е. вместо \mathbf{R} задан вектор $\mathbf{R}^* = \mathbf{R} + \Delta\mathbf{r}$. Тогда по формуле (1) вместо орта \mathbf{i}_k находим его аппроксимацию \mathbf{i}_k^* . В первом приближении

$$\mathbf{i}_k^* = \mathbf{i}_k - \mathbf{i}_k \times \left(\mathbf{i}_k \times \frac{\Delta\mathbf{r}}{\|\mathbf{r}_k\|} \right). \quad (2)$$

Пусть в момент t_* от астроизмерительной системы поступают точные значения параметров ориентации трехгранника $x_1y_1z_1$ относительно XYZ . Пусть эти параметры имеют вид ортогональной (3×3) -матрицы D , задающей преобразование координат из системы $x_1y_1z_1$ в систему XYZ . Представим D в виде

$$D = C[E_3 + \Phi(\beta)], \quad (3)$$

где C — (3×3) -матрица преобразования координат из системы xuz в систему XYZ ; E_3 — единичная (3×3) -матрица; $\beta = [\beta_x \beta_y \beta_z]^T$ — представленный в системе координат xuz вектор малой угловой ошибки, характеризующий отклонение трехгранника $x_1y_1z_1$ от xuz ; Φ — кососимметрическая (3×3) -матрица, задающая в конкретной системе координат векторное произведение трехмерных векторов вида $\Phi(\mathbf{p})\mathbf{q} = \mathbf{p} \times \mathbf{q}$; индекс T означает транспонирование.

Задача определения ориентации трехгранника xuz сведена к оценке вектора β и нахождению матрицы C на основании формулы (3). Целью коррекции считаем достижение такой точности, чтобы линейное смещение изображения в кадре камеры, вызванное остаточной ошибкой определения ориентации трехгранника xuz , было соизмеримо с разрешающей способностью камеры. Существенно, что точность привязки ориентиров на местности должна быть не хуже разрешающей способности камеры.

Вычислим координаты орта $\mathbf{e}_k^* = D^T \mathbf{i}_k^*$. Из (1), (2) следует в первом приближении

$$\mathbf{e}_k^* - \mathbf{e}_k = \mathbf{e}_k \times \beta - \mathbf{e}_k \times \left(\mathbf{e}_k \times \frac{D^T \Delta\mathbf{r}}{\|\mathbf{r}_k\|} \right). \quad (4)$$

Условие существования и единственности решения системы уравнений вида (4) относительно векторов β , $\Delta\mathbf{r}$ получим построением демонстрационного алгоритма, определяющего это решение.

По условиям визирования ориентиров M_k величины $\|\mathbf{r}_k\|$ различаются незначительно. Поэтому при конструировании демонстрационного алгоритма можно положить $D^T \Delta \mathbf{r} / \|\mathbf{r}_k\| = \delta \mathbf{r}$ независимо от значения k . Тогда из (4) следует

$$\mathbf{e}_j^T (\mathbf{e}_k^* - \mathbf{e}_k) + \mathbf{e}_k^T (\mathbf{e}_j^* - \mathbf{e}_j) = (1 - \mathbf{e}_j^T \mathbf{e}_k)(\mathbf{e}_j^T + \mathbf{e}_k^T) \delta \mathbf{r}, \quad (5)$$

$$\mathbf{e}_j^T (\mathbf{e}_k^* \times \mathbf{e}_k) + \mathbf{e}_k^T (\mathbf{e}_j^* \times \mathbf{e}_j) = (1 - \mathbf{e}_j^T \mathbf{e}_k)(\mathbf{e}_j^T + \mathbf{e}_k^T) \beta \quad (j \neq k).$$

Из (5) видно, что оценку векторов $\beta, \delta \mathbf{r}$ можно найти однозначно, если результатам визирования трех ориентиров M_k соответствуют три некопланарных вектора \mathbf{e}_k . В реальной ситуации вместо использования формул (5) следует оценивать $\beta, \Delta \mathbf{r}$ путем решения системы векторных уравнений (4), например, методом наименьших квадратов.

Определение взаимной ориентации камеры и астроизмерительной системы — динамическая фильтрация. На практике поле зрения камеры может оказаться столь узким, что смешанное произведение ортов направлений на три ориентира, одновременно находящихся в кадре, весьма мало. Вследствие этого малые погрешности измерения направлений ортов \mathbf{e}_k приводят к неприемлемо большим ошибкам решения уравнений (4).

Откажемся от оценивания вектора $\Delta \mathbf{r}$ в составе решения уравнений (4). Основанием для этого может быть определение вектора \mathbf{R} с помощью установленной на КА высокоточной аппаратуры потребителя глобальной спутниковой системы позиционирования типа GPS. Тогда для оценки вектора β с использованием упрощенных уравнений (4) достаточно измерить в момент t_* два неколлинеарных орта \mathbf{e}_k . Точность оценивания при этом возрастает, однако все же может оказаться недостаточной вследствие влияния ошибок измерений, к которым добавляются ошибки позиционирования. Чтобы уменьшить это влияние, прибегнем к оцениванию вектора β в режиме динамической фильтрации на конечном промежутке измерений.

Положим вначале, что камера определяет орт \mathbf{e} направления на точку S из единственного ориентира, находящегося в ее поле зрения. При этом движение КА должно быть организовано так, чтобы названный ориентир находился в кадре камеры в течение всего промежутка измерений. Пусть значения $\mathbf{R}, \mathbf{e}, D$ определяются синхронно в моменты времени, разделенные некоторым интервалом дискретности (моменты обновления). На основании этих измерений по формуле, аналогичной (1), находится вектор \mathbf{i} — орт направления \mathbf{e} , представленный в системе XYZ , — и формируется орт $\mathbf{e}^* = D^T \mathbf{i}$. Матрицы C и D удовлетворяют уравнениям

$$\dot{C} = C \Phi(\omega_C), \quad \dot{D} = D \Phi(\omega_D), \quad (6)$$

где ω_C, ω_D — представления вектора абсолютной угловой скорости КА соответственно в системах координат $x_1 y_1 z_1$.

По аналогии с (4) находим $\mathbf{e}^* - \mathbf{e} = \Phi(\mathbf{e})\beta$. Очевидно, как бы ни изменял свое направление в пространстве расчетный орт \mathbf{i} , соответствующий ему

наземный ориентир оказывается в узком поле зрения камеры лишь при условии, что орт \mathbf{e} близок к оптической оси камеры. Поэтому координата β_z вектора β слабо наблюдаема по рассматриваемым измерениям.

Примем, что оценка β^* вектора β найдена к очередному моменту обновления с текущей ошибкой в виде вектора $\Delta\beta = \beta - \beta^* = [\Delta\beta_x \Delta\beta_y \Delta\beta_z]^T$. На основании (3) получим соответствующую оценку матрицы C в виде $C_* = D[E_3 - \Phi(\beta^*)]$. В первом приближении $C_* = C[E_3 + \Phi(\Delta\beta)]$.

Выполним преобразование $\mathbf{e}^* = C_*^T \mathbf{i}$. В первом приближении

$$\mathbf{e}^* - \mathbf{e} = \Phi(\mathbf{e}) \Delta\beta. \quad (7)$$

Это уравнение измерений для динамической системы, состояние которой подлежит оценке. Уравнение состояния для этой системы имеет вид $\dot{\Delta\beta} = 0$. Поэтому в рассматриваемом случае нет необходимости в операции прогноза, характерной вообще для алгоритмов рекуррентной фильтрации. Непосредственно для оценки вектора $\Delta\beta$ целесообразно использовать алгоритм обновления, основанный на рекуррентном методе наименьших квадратов с элементами гарантированного и размытого эллипсоидального оценивания [5]. Этот алгоритм достаточно подробно представлен в [6] и здесь не приводится. Очередная оценка ошибки $\Delta\beta$ исключается из β^* сразу же после ее получения.

Из выражения (7) следует, что полная наблюдаемость названной динамической системы имеет место лишь при условии $\mathbf{e} \neq \text{const}$, когда направление на ориентир не сохраняет неизменное положение в поле зрения камеры. Обеспечение этого условия входит в задачу вышеупомянутого режима коррекции. Более благоприятная ситуация имеет место, если в процессе коррекции в кадре камеры одновременно находятся два наземных ориентира. Однако и в этом случае вследствие ограниченных размеров кадра составляющая β_z вектора β остается слабо наблюдаемой.

При моделировании изложенной методики уточнения ориентации камеры предполагалось, что КА движется по круговой околоземной орбите высотой 650 км с наклоном 98° . Режим собственно коррекции длился 100 с. В начале промежутка коррекции — в момент $t = 0$ — КА находился в точке орбиты с аргументом широты $52,8^\circ$, в конце — в точке с аргументом широты 59° . Предполагалось, что кадр камеры отображает квадрат на земной поверхности со стороной 36 км. В процессе коррекции имитировалось движение объекта, при котором в кадре камеры в моменты обновления одновременно находятся два ориентира. Первый из них задавался как точка на земной поверхности, смещенная в момент $t = 0$ на 12 км вдоль географической параллели от подспутниковой точки, соответствующей точке орбиты с аргументом широты $55,8^\circ$. Второй ориентир отстоял от первого на $10'$ по широте и на $7'$ по долготе. Точность топопривязки ориентиров составляла 1 м. Считалось, что камера определяет направление на ориентир с точностью до случайных ошибок, равномерно распределенных в промежутке $\pm 4''$ (при указанной высоте орбиты это соответствует разрешению 13 м). Такое предположение оправданно, поскольку указанные ошибки имеют природу ошибок округления. Координаты КА в системе XYZ задавались

с гауссовыми случайными ошибками, имеющими нулевое математическое ожидание и стандартное отклонение 33 м. Ошибки астросистемы воспроизводились как повороты вокруг осей x_1, y_1, z_1 на углы со случайными значениями, распределенными по нормальному закону со стандартными отклонениями $10''$. Интервал между моментами обновления составлял 1 с. По окончании процесса наблюдений и оценивания объект приводился в положение, при котором трехгранник xuz с точностью до ошибок стабилизации совмещен с трехгранником $\xi\eta\zeta$, а найденная оценка β^* использовалась для определения параметров ориентации камеры по данным астроизмерительной системы.

На рис. 1 показано изменение углов тангажа ϑ , крена γ и рыскания ψ в процессе моделирования. Поведение углов ϑ и γ связано с отслеживанием ориентиров, изменение ψ представляет собой маневр, специально заданный для улучшения наблюдаемости.

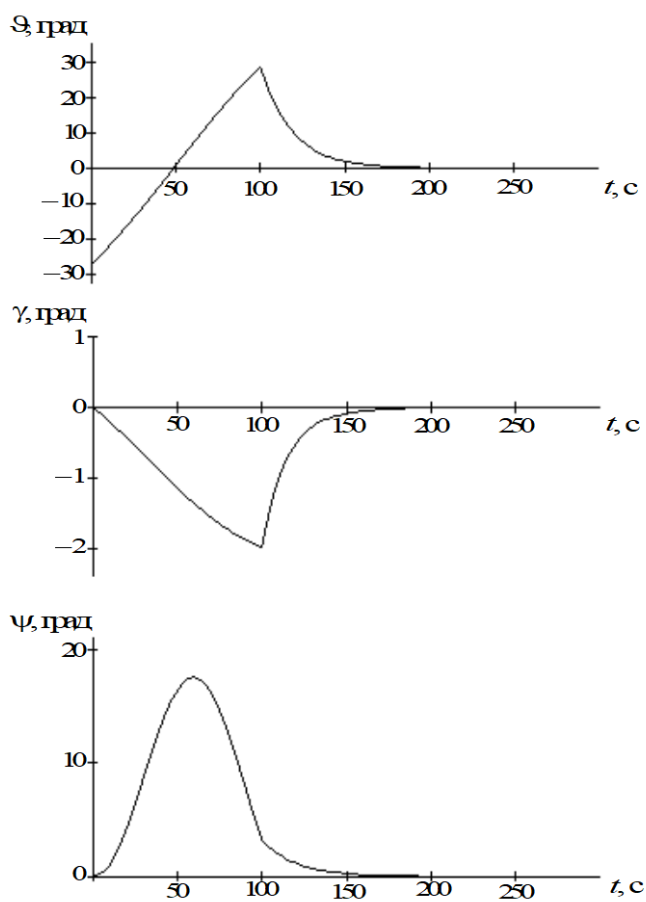


Рис. 1

На рис. 2 представлены полученные в одном из вариантов моделирования типичные графики остаточных ошибок $\beta_x, \beta_y, \beta_z$ после коррекции (в угловых минутах), а также график величины $\beta_{\text{ном}} = \|\beta\|$ (в градусах). Видно, что ошибки β_x, β_y (ошибки воспроизведения направления оптической оси) от начальных значений $2'$ довольно быстро уменьшаются до значений порядка угловых секунд. Ошибка β_z (поворот вокруг оптической оси), имевшая вначале величину поряд-

ка $3'$, также уменьшается до значений, вполне приемлемых с учетом сделанного выше замечания о допустимой точности. Подобные результаты получены в вариантах моделирования с иными начальными условиями и иными реализациями случайных возмущений.

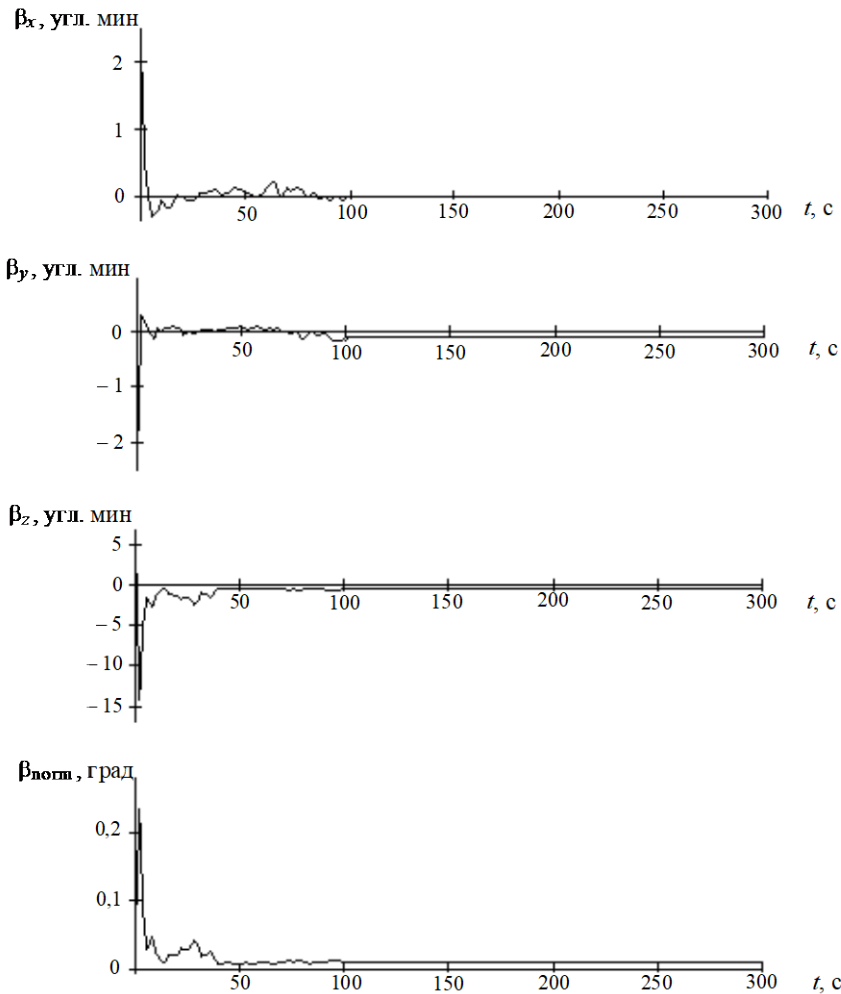


Рис. 2

Согласование приборных трехгранников астроизмерительной системы и гироблока. Сценарий некоторых режимов съемки земной поверхности предполагает чередование участков относительно медленных угловых движений КА с участками интенсивных движений, неблагоприятных для функционирования астроизмерительной системы. В таком случае функция слежения за ориентацией камеры относительно опорного трехгранника возлагается на бесплатформенный блок измерителей угловой скорости (гироблок), также жестко связанный с корпусом КА. Если угловое положение гироблока относительно приборного трехгранника астроизмерительной системы известно с недопустимой неопределенностью, то необходимо уточнить это положение по данным астроизмерительной системы на участке точного функционирования последней. Тем самым определяется взаимное положение камеры и гироблока, так что в последующем по данным об ориентации гироблока могут быть найдены параметры ориентации камеры. Одновременно следует оценить коэффициенты заданной модели погрешностей чувствительных элементов гироблока. Подобные задачи рассмотрены в [6, 7].

При решении этой задачи используем кинематические соотношения в кватернионной форме, так как векторные части кватернионов в качестве объектов выполняемых преобразований представляются более наглядными и удобными, чем кососимметрические составляющие матриц. Будем рассматривать кватернион как сумму скалярной и векторной частей [8], не делая различия в обозначениях для векторных частей кватернионов, физических трехмерных векторов и соответствующих столбцевых матриц. Знак \circ — символ умножения кватернионов, надчеркиванием отмечается сопряженный кватернион.

Пусть 123 — правый ортогональный приборный трехгранник гироблока, P — нормированный кватернион, задающий вообразаемый поворот трехгранника XYZ в положение 123 [8], Λ — нормированный кватернион, характеризующий таким же образом ориентацию трехгранника $x_1y_1z_1$ относительно XYZ. Кватернион Λ определяется по показаниям астроизмерительной системы; его значение Λ_0 в начальный момент $t = t_0$ запоминается. Кватернион P удовлетворяет уравнению $\dot{P} = \frac{1}{2}P \circ \omega_G$, где ω_G — вектор абсолютной угловой скорости КА в проекциях на оси трехгранника 123. Поскольку начальное значение $P(t_0) = P_0$ точно не известно, аппроксимируем его кватернионом $Q_0 = \Lambda_0$, считая угловое рассогласование трехгранников 123 и $x_1y_1z_1$ малым. Кватернион Q , аппроксимирующий P при $t > t_0$, находится численным интегрированием уравнения

$$\dot{Q} = \frac{1}{2}Q \circ \omega_G^*, \quad (8)$$

где ω_G^* — неточное значение ω_G , измеренное чувствительными элементами гироблока; $\delta\omega_G = \omega_G^* - \omega_G$ — вектор малой ошибки измерений.

Нормированный кватернион, характеризующий изменение ориентации КА в течение промежутка времени $[t_0, t]$ и заданный в системе координат XYZ, находится по формуле

$$F = f_0 + \mathbf{f} = \Lambda \circ \bar{\Lambda}_0. \quad (9)$$

Положим $P = M \circ Q$. Это формула оценки текущего значения P . Нормированный кватернион $M = \mu_0 + \mu$ с малой векторной частью μ характеризует текущую ошибку определения ориентации трехгранника 123. Дифференцируя выражение $M = P \circ \bar{Q}$ с учетом уравнений, которым удовлетворяют P и Q , нетрудно видеть, что $M = \text{const}$, если $\delta\omega_G = 0$. В общем случае используем представление $M = N^* \circ K$, где $N^* = v_0^* + v^* = \text{const}$ — нормированный кватернион, характеризующий ошибку задания начальной ориентации трехгранника 123, $\|v^*\| \ll 1$, $K \approx 1 + \chi^*$. По определению начальных условий, вектор v^* характеризует также рассогласование трехгранников 123 и $x_1y_1z_1$. Учитывая (8), находим

$$\dot{\chi}^* \approx -\frac{1}{2}A\delta\omega_G, \quad \chi(t_0) = 0. \quad (10)$$

Здесь $A = A(Q)$ — (3×3) -матрица, задающая то же преобразование координат произвольного трехмерного вектора, что и кватернион Q .

Пусть модель ошибок чувствительных элементов гироблока учитывает n возмущающих факторов по формуле

$$\delta \omega_G = \sum_{j=1}^n \Psi_j(t) \mathbf{c}_j, \quad (11)$$

где Ψ_j — непрерывные функции, зависящие от времени непосредственно или через параметры движения КА и учитывающие влияние отдельных возмущающих факторов; $\mathbf{c}_j = \text{const}$ — трехмерные векторы неизвестных коэффициентов.

Вычислим кватернион $S = s_0 + \mathbf{s} = Q \circ \bar{Q}_0$. Так как $P \circ \bar{P}_0 = F$, то на основании (9) находим $K \circ S = \bar{N}^* \circ F \circ N^*$. Отсюда и из (9)–(11) следует в первом приближении

$$2\Phi(\mathbf{f}) \mathbf{v}^* - [\Phi(\mathbf{s}) - s_0 E_3] \sum_{j=1}^n \Theta_j \mathbf{c}_j = \mathbf{s} - \mathbf{f}, \quad \Theta_j = \frac{1}{2} \int_{t_0}^t A \Psi_j dt. \quad (12)$$

Это уравнение измерений в рассматриваемой задаче. Искомыми неизвестными являются элементы векторов \mathbf{v}^* , \mathbf{c}_j . Методика нахождения корректирующих поправок к искомым параметрам с использованием приближений, найденных к моменту очередного измерения, и алгоритм рекуррентного оценивания представлены в [6].

При моделировании процесса калибровки гироблока по показаниям астроизмерительной системы оценивались ошибки задания начальной ориентации гироблока и постоянный дрейф измерителей угловой скорости ($\delta \omega_G = \mathbf{d} = [d_x \ d_y \ d_z]^T = \text{const}$). В составе модели ошибок гироблока также имели место, но не оценивались, ошибки масштабных коэффициентов в пределах 0,00015–0,0003. Кроме того, в показания измерителей угловой скорости вводились гауссовы шумы с нулевым средним и стандартным отклонением 0,1 град/час. Ошибки астроизмерительной системы имитировались, как в предыдущем примере. Для обеспечения полной наблюдаемости искомого вектора состояния выполнялся относительно несложный маневр с изменением угла крена γ . Оценивание векторов \mathbf{v}^* , \mathbf{d} выполнялось на промежутке $0 \leq t \leq 200$ с, затем найденные оценки использовались для определения ориентации камеры по информации от гироблока. На рис. 3 показано изменение элементов вектора остаточных ошибок определения ориентации $\varphi = [\varphi_x \ \varphi_y \ \varphi_z]^T$ (в угловых минутах) и величины $\varphi_{\text{порт}} = \|\varphi\|$ (в градусах) в одном из вариантов моделирования. На рис. 4 представлены графики ошибок оценивания составляющих постоянного дрейфа — координат вектора $\delta \mathbf{d} = \mathbf{d}^* - \mathbf{d} = [\delta d_x \ \delta d_y \ \delta d_z]^T$, где \mathbf{d}^* — найденная оценка вектора \mathbf{d} . Заметна хорошая точность оценивания искомых параметров.

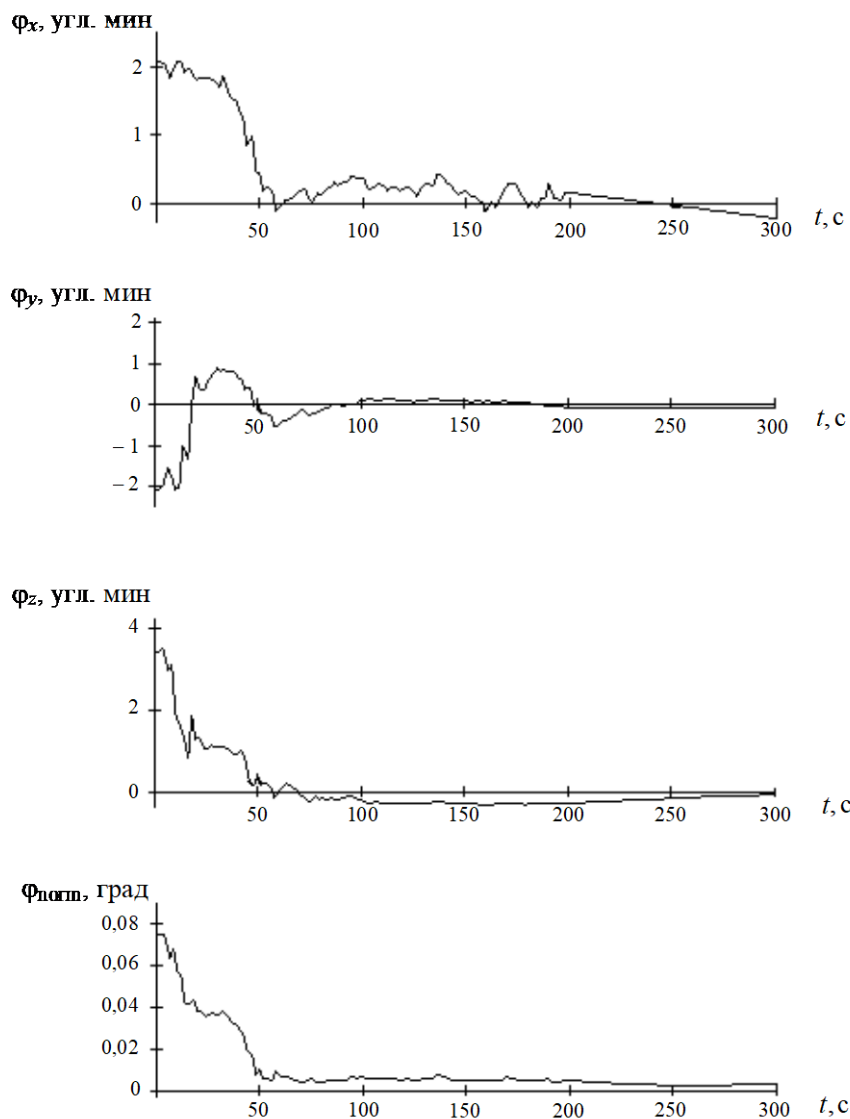


Рис. 3

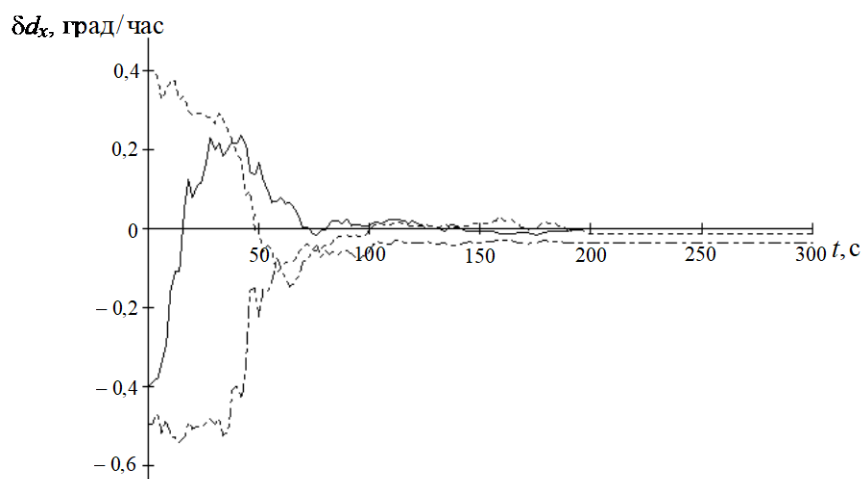


Рис. 4

Калибровка гироскопа и анализ наблюдаемости. Изложенное выше решение задачи калибровки гироскопа, схематически близкое к [7], не является единственно возможным. В частности, иная схема калибровки получается на основе подхода, изложенного в [6]. Приведем еще одно решение, удобное с точки зрения анализа наблюдаемости искомых параметров.

Придерживаясь введенных выше обозначений, проинтегрируем уравнение (8) с начальным условием $Q_0 = Q(t_0) = \Lambda_0$. Положим $P = \Lambda \circ X$. Кватернион $X = \chi_0 + \chi$ характеризует отклонение трехгранника 123 от $x_1 y_1 z_1$. Если ω_D — вектор угловой скорости КА, представленный в системе координат $x_1 y_1 z_1$, то

$$\dot{\Lambda} = \frac{1}{2} \Lambda \circ \omega_D, \quad \omega_G = \bar{X} \circ \omega_D \circ X, \quad \omega_G - \omega_D \approx 2\Phi(\omega_G)\chi. \quad (13)$$

Введем представление $Q = U \circ \Lambda$, где $U = u_0 + \mathbf{u}$ — нормированный кватернион. Учитывая (13), находим

$$\mathbf{u}(t) = \mathbf{u}(\chi, \mathbf{c}_j) = \int_{t_0}^t A(Q)\Phi(\omega_G)dt\chi + \sum_{j=1}^n \Theta_j \mathbf{c}_j, \quad \mathbf{u}(t_0) = 0. \quad (14)$$

Это уравнение измерений относительно χ, \mathbf{c}_j .

Пусть к очередному моменту измерений (обновления) вычислены приближенные значения χ^*, \mathbf{c}_j^* соответствующих векторов. Подставив эти приближения вместо χ, \mathbf{c}_j в формулу (14), получим оценку $\mathbf{u}^* = \mathbf{u}(\chi^*, \mathbf{c}_j^*)$. Используя кватернион Λ , поступивший от астроизмерительной системы, найдем точное значение \mathbf{u} как векторную часть кватерниона $U = Q \circ \bar{\Lambda}$. Тогда

$$\mathbf{u} - \mathbf{u}^* = \int_{t_0}^t A(Q)\Phi(\omega_G)dt\delta\chi + \sum_{j=1}^n \Theta_j \delta\mathbf{c}_j, \quad \delta\chi = \chi - \chi^*, \quad \delta\mathbf{c}_j = \mathbf{c}_j - \mathbf{c}_j^*.$$

Рассматривая это равенство как очередное уравнение измерений в рекуррентном алгоритме динамической фильтрации, найдем поправки $\delta\chi, \delta\mathbf{c}_j$ и уточним оценки χ^*, \mathbf{c}_j^* .

Анализ наблюдаемости вектора состояния, составленного из векторов χ, \mathbf{c}_j , выполним как поиск ненаблюдаемых значений этого вектора — ненулевых векторов состояния, удовлетворяющих тождеству $\mathbf{u}(\chi, \mathbf{c}_j) \equiv 0$. Как видно из (12), (14), ненаблюдаемые состояния должны также удовлетворять условию

$$\Phi(\omega_G)\chi + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n \Psi_j \mathbf{c}_j \equiv 0. \quad (15)$$

Ограничимся случаем, когда в модели ошибок гироскопа учитываются постоянный дрейф \mathbf{d} , неортогональность трехгранника 123 и ошибки масштабных коэффициентов. При этом тождество (15) представим как

$$L\omega_G + \mathbf{d} \equiv 0. \quad (16)$$

Здесь $L = \text{const}$ — (3×3) -матрица общего вида, подлежащая оцениванию. Ее кососимметрическая часть учитывает фактор χ , элементы главной диагонали — ошибки масштабных коэффициентов, а симметрическая часть без главной диагонали — влияние неортогональности трехгранника 123. Нетрудно видеть, что система уравнений вида (16) относительно L, \mathbf{d} не имеет ненулевого решения на промежутке наблюдения и коррекции, т.е. рассматриваемая динамическая система вполне наблюдаема, если на этом промежутке найдутся три момента времени, которым соответствуют некомпланарные векторы ω_G , и участок, на котором $\omega_G \equiv 0$.

Выполненное моделирование показало, что для одновременной оценки расогласования трехгранников $x_1 y_1 z_1$ и 123, постоянного дрейфа измерителей угловой скорости и ошибок масштабных коэффициентов требуются весьма сложные и достаточно интенсивные движения КА относительно центра масс. Поэтому предпочтительно ограничиться оцениванием наиболее весомой составляющей модели ошибок гироблока, например постоянного дрейфа, а остальные возмущающие факторы сделать по возможности малыми.

Определение параметров движения КА по наземным точечным ориентирам. Представленный выше метод определения взаимной ориентации оптического устройства и астроизмерительной системы посредством динамической фильтрации может оказаться неудобным из-за необходимости сложных маневров объекта и значительной продолжительности процесса оценивания. Рассмотрим иной алгоритм решения указанной задачи, позволяющий получить искомые оценки на основании одноразовых измерений и к тому же не требующий использования аппаратуры GPS.

Изложим процедуру определения параметров движения КА, использующую точечные ориентиры (реперные точки) на поверхности Земли. В основе процедуры лежат результаты, изложенные в [9–11].

Рис. 5 иллюстрирует построение отображения точечного ориентира по правилам геометрической оптики. Изображение m некоторой точки M , наблюдаемой на земной поверхности, формируется в результате пересечения линии визирования SM оптической системы (S — центр проекции) с плоскостью изображения Π . Плоскость Π может рассматриваться как математическая конструкция, задаваемая известными аксиомами проективной геометрии [12], либо как некоторое средство регистрации информации о среде, окружающей подвижный объект [10].

Оси x_π и y_π координатной системы $x_\pi y_\pi$ на плоскости изображений Π , показанной на рис. 5, коллинеарны соответственно осям x и y введенного ранее трехгранника $x y z$, связанного с камерой. Наконец, через $X_G Y_G Z_G$ обозначим систему координат на поверхности Земли (именуемую далее земной системой координат) с осью Z_G , совпадающей с местной вертикалью. В этой системе координат следует определить местоположение объекта и его ориентацию; последнюю условимся характеризовать матрицей направляющих косинусов $A = \{\alpha_{ij}\}$ ($i, j = 1, 2, 3$), задающей преобразование из системы $X_G Y_G Z_G$ в $x y z$.

Доопределим инерциальный трехгранник XYZ , направив ось Y по оси мира в сторону Полярной звезды, а ось Z — в точку весеннего равноденствия. Положение центра проекции S в системе координат $X_G Y_G Z_G$ задается радиус-

вектором \mathbf{r} ; представление его $\{X, Y, Z\}$ (а также других векторов) в системе $X_G Y_G Z_G$ будем отмечать нижним индексом I , а в системе координат xuz — индексом E . Вектор $\mathbf{r}_G = \{X_3, Y_3, Z_3\}$ определяет положение точки M в земной системе координат.

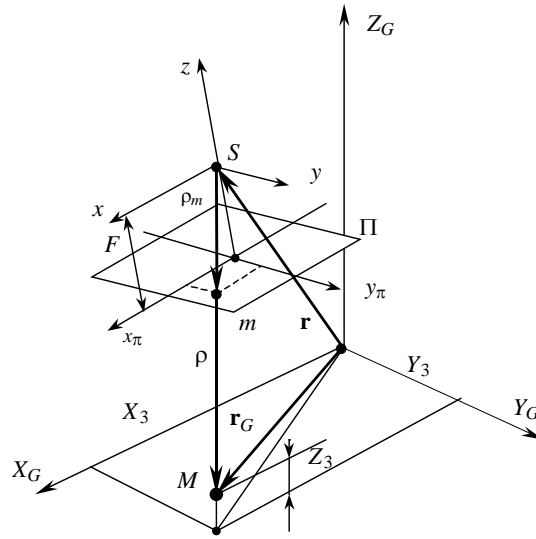


Рис. 5

Из рис. 5 следует, что

$$\rho_m = \kappa \rho, \quad \rho = \mathbf{r}_G - \mathbf{r} \quad (17)$$

(κ — постоянный коэффициент). В системе координат xuz $\rho_m = \{x_m, y_m, -F\}$, $\rho_E = \{\rho_x, \rho_y, \rho_z\} = \mathbf{A} \rho_I$; где F — фокусное расстояние оптической системы.

Тогда первое соотношение в (17) в координатной форме принимает вид

$$\frac{x_m}{\rho_x} = \frac{y_m}{\rho_y} = -\frac{F}{\rho_z} = \kappa, \quad (18)$$

Равенства (18) позволяют установить связь между координатами точки m на плоскости изображений Π и параметрами, характеризующими положение и ориентацию КА в системе координат $X_G Y_G Z_G$:

$$\begin{aligned} x &= -F \frac{\alpha_{11}(X_3 - X_I) + \alpha_{12}(Y_3 - Y_I) + \alpha_{13}(Z_3 - Z_I)}{\alpha_{31}(X_3 - X_I) + \alpha_{32}(Y_3 - Y_I) + \alpha_{33}(Z_3 - Z_I)}, \\ y &= -F \frac{\alpha_{21}(X_3 - X_I) + \alpha_{22}(Y_3 - Y_I) + \alpha_{23}(Z_3 - Z_I)}{\alpha_{31}(X_3 - X_I) + \alpha_{32}(Y_3 - Y_I) + \alpha_{33}(Z_3 - Z_I)}. \end{aligned} \quad (19)$$

Пусть точка M лежит на плоскости $X_G Y_G$ ($\mathbf{r}_G = \{X_3, Y_3, 0\}$) и выполняются следующие условия: $\mathbf{r}_I = \{0, 0, Z_*\}$; $\mathbf{A} = \mathbf{E}_3$ (\mathbf{E}_3 — единичная матрица). Соотношения (19) при указанных условиях запишем в виде равенств

$$x^* = FX_3 / Z_*, \quad y^* = FY_3 / Z_*. \quad (20)$$

Примем x^* и y^* в качестве координат эталонного отображения точки M на плоскость Π .

При произвольном положении и ориентации КА формулы (19) с учетом (20) представим в следующем виде:

$$x = \frac{a_1 x^* + a_2 y^* + a_3}{a_7 x^* + a_8 y^* + 1}, \quad y = \frac{a_4 x^* + a_5 y^* + a_6}{a_7 x^* + a_8 y^* + 1}, \quad (21)$$

где обозначено

$$\begin{aligned} a_1 &= \alpha_{11} Z_* / Z_E, \quad a_2 = \alpha_{12} Z_* / Z_E, \quad a_3 = -FX_E / Z_E, \\ a_4 &= \alpha_{21} Z_* / Z_E, \quad a_5 = \alpha_{22} Z_* / Z_E, \quad a_6 = -FY_E / Z_E, \\ a_7 &= -\alpha_{31} Z_* / (FZ_E), \quad a_8 = -\alpha_{32} Z_* / (FZ_E). \end{aligned} \quad (22)$$

Коэффициенты a_i ($i = 1, \dots, 8$) связаны между собой, как следует из (22), равенствами типа

$$a_1^2 + a_4^2 + F^2 a_7^2 = Z_*^2 / Z_E^2, \quad a_1 a_2 + a_4 a_5 + F^2 a_7 a_8 = 0.$$

Выражения (21) образуют восьмипараметрическую группу проективных преобразований на плоскости и при известных значениях коэффициентов a_i ($i = 1, \dots, 8$) позволяют определить искомые параметры движения КА:

$$\begin{aligned} \alpha_{11} &= a_1 / q, \quad \alpha_{12} = a_2 / q, \quad \alpha_{13} = F(a_5 a_7 - a_4 a_8) / q^2, \\ \alpha_{21} &= a_4 / q, \quad \alpha_{22} = a_5 / q, \quad \alpha_{23} = F(a_1 a_8 - a_2 a_7) / q^2, \\ \alpha_{31} &= -Fa_7 / q, \quad \alpha_{32} = -Fa_8 / q, \quad \alpha_{33} = (a_1 a_5 - a_2 a_4) / q^2, \\ X_E &= -Z_* a_3 / (qF), \quad Y_E = -Z_* a_6 / (qF), \quad Z_E = Z_* / q, \end{aligned} \quad (23)$$

$$\mathbf{r}_I = A^T \mathbf{r}_E, \quad q = (a_1^2 + a_4^2 + F^2 a_7^2)^{1/2}.$$

Определяющим для вычисления коэффициентов a_i ($i = 1, \dots, 8$) является утверждение теоремы 4 [13, с. 603]. Согласно этому утверждению, если на проективной плоскости заданы две четверки точек m_i^* и m_i ($i = \overline{1, 4}$), причем никакие три точки, принадлежащие одной и той же четверке, не лежат на одной прямой, то существует одно и только одно проективное преобразование проективной плоскости, переводящее каждую из точек одной четверки в соответствующую точку другой (m_i^* в m_i).

В пространстве $X_G Y_G Z_G$ зададим координаты четырех точек M_i . Используя результаты измерений координат x_i, y_i точек m_i ($i = \overline{1, 4}$) — отображений реперных точек M_i на плоскость Π , — с помощью выражений (21) сформируем систему из восьми линейных алгебраических уравнений относительно неизвестных параметров преобразования (21):

$$a_1 x_i^* + a_2 y_i^* + a_3 = x_i (a_7 x_i^* + a_8 y_i^* + 1),$$

$$a_4 x_i^* + a_5 y_i^* + a_6 = y_i (a_7 x_i^* + a_8 y_i^* + 1), \quad (24)$$

$$(i = 1, \dots, 4).$$

Здесь x_i^* и y_i^* — координаты эталонного отображения точек M_i ($i = 1, \dots, 4$) на проективную плоскость Π , определяемые по формулам (20).

При выполнении отмеченных выше ограничений на расположение точечных ориентиров решение системы уравнений (24) существует и единственно [13].

Важно отметить, что для высокоточного определения параметров движения КА изложенные результаты следует обобщить на случай, когда реперные точки не лежат на одной плоскости.

Пусть вектор $\mathbf{r}_G = \{X_3, Y_3, Z_3\}$, как и ранее, определяет положение одной из этих точек M_i в земной системе координат. Связь между эталонным отображением (20) точки, лежащей на плоскости $X_G Y_G$ (с координатами X_3, Y_3), и эталонным отображением

$$x^+ = -FX_3 / (Z_3 - Z_*), \quad y^+ = -FY_3 / (Z_3 - Z_*)$$

точки M_i с координатой Z_3 , отличной от нуля, устанавливается соотношениями

$$x^+ = x^* / (1 - Z_3 / Z_*), \quad y^+ = y^* / (1 - Z_3 / Z_*). \quad (25)$$

Если реперная точка не лежит на плоскости $X_G Y_G$, то в общем случае ее положение на плоскости Π определяется выражениями (19). Разложим их в ряд по степеням Z_3 относительно точки с $Z_3 = 0$:

$$\begin{aligned} x &= x^0 + \frac{\partial x^0}{\partial Z_3} Z_3 + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 x^0}{\partial Z_3^2} Z_3^2 + \dots, \\ y &= y^0 + \frac{\partial y^0}{\partial Z_3} Z_3 + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 y^0}{\partial Z_3^2} Z_3^2 + \dots, \end{aligned} \quad (26)$$

где верхний индекс 0 означает, что соответствующие коэффициенты вычислены при $Z_3 = 0$.

Поскольку выполняются равенства

$$\frac{\partial^2 x^0}{\partial Z_3^2} = -\frac{2\alpha_{33}}{z_0} \frac{\partial x^0}{\partial Z_3}, \quad \frac{\partial^2 y^0}{\partial Z_3^2} = -\frac{2\alpha_{33}}{z_0} \frac{\partial y^0}{\partial Z_3},$$

приведем соотношения (26) к виду

$$x = x^0 + \frac{\partial x^0}{\partial Z_3} Z_3 \left(1 - \alpha_{33} \frac{Z_3}{z_0}\right) + \dots, \quad y = y^0 + \frac{\partial y^0}{\partial Z_3} Z_3 \left(1 - \alpha_{33} \frac{Z_3}{z_0}\right) + \dots \quad (27)$$

Здесь введены следующие обозначения:

$$\frac{\partial x^0}{\partial Z_3} = -F \frac{\alpha_{13} z_0 - \alpha_{33} x_0}{z_0^2}, \quad \frac{\partial y^0}{\partial Z_3} = -F \frac{\alpha_{23} z_0 - \alpha_{33} y_0}{z_0^2},$$

$$\begin{aligned}x_0 &= \alpha_{11}X_3 + \alpha_{12}Y_3 - X_E, \quad y_0 = \alpha_{12}X_3 + \alpha_{22}Y_3 - Y_E, \\z_0 &= \alpha_{31}X_3 + \alpha_{32}Y_3 - Z_E,\end{aligned}\tag{28}$$

$$\begin{aligned}X_E &= \alpha_{11}X_I + \alpha_{12}Y_I + \alpha_{13}Z_I, \quad Y_E = \alpha_{21}X_I + \alpha_{22}Y_I + \alpha_{23}Z_I, \\Z_E &= \alpha_{31}X_I + \alpha_{32}Y_I + \alpha_{33}Z_I.\end{aligned}$$

Измерения (25) и (19) приведем к плоскости $X_G Y_G$. Для этого указанные соотношения необходимо разрешить относительно x^* , y^* и x^0 , y^0 соответственно.

Так, из (25) имеем

$$x^* = x^+(1 - Z_3/Z_*), \quad y^* = y^+(1 - Z_3/Z_*).\tag{29}$$

Чтобы вычислить x^0 , y^0 , с помощью выражений (27), (28) построим рекуррентную процедуру

$$\begin{aligned}x_{n+1}^0 &= x - \frac{\partial x_n^0}{\partial Z_3} Z_3 \left(1 - \alpha_{33,n} \frac{Z_3}{z_{0,n}} \right) + \dots, \\y_{n+1}^0 &= y - \frac{\partial y_n^0}{\partial Z_3} Z_3 \left(1 - \alpha_{33,n} \frac{Z_3}{z_{0,n}} \right) + \dots,\end{aligned}\tag{30}$$

считая, что при $n = 0$ $x_1^0 = x$, $y_1^0 = y$.

Рекуррентная процедура (30), реализуемая для каждой реперной точки, предполагает известными коэффициенты $\frac{\partial x_n^0}{\partial Z_3}$ и $\frac{\partial y_n^0}{\partial Z_3}$. Их вычисление включает решение уравнений (24) и оценку параметров движения КА по формулам (23), причем в системе уравнений (24) коэффициенты x_i^* , y_i^* определяются для каждой точки соотношениями (29), а x_i и y_i заменяются соответственно переменными $x_{i,n}^0$ и $y_{i,n}^0$. Таким образом, результат окончания итерационной процедуры — оценки значений искомым координат местоположения КА и параметров его ориентации в системе координат $X_G Y_G Z_G$.

Оценим точность вычисления параметров движения КА на примере спутника дистанционного зондирования Земли, обращающегося по круговой орбите.

Конкретизируем положение и ориентацию введенной выше земной системы координат $X_G Y_G Z_G$. Ее начало поместим в точке на поверхности Земли с географической широтой φ_* и долготой λ_* , находящейся на трассе полета КА в районе расположения выбранных точечных ориентиров. Зафиксируем положение системы $X_G Y_G Z_G$ в начальный момент времени ($t = t_0$), считая, что ось X_G лежит в плоскости орбиты КА и направлена в сторону его движения, а ось Z_G (как отмечалось ранее) направлена по местной вертикали. Это положение земной системы координат обозначим $X_G^* Y_G^* Z_G^*$. Будем далее считать, что система ко-

ординатных осей $X_G^* Y_G^* Z_G^*$ не участвует в суточном вращении Земли; ее ориентацию в инерциальном пространстве определим собственным кватернионом

$$P = P_\Omega \circ P_i \circ P_u,$$

$$P_\Omega = \{\cos(\Omega/2), 0, \sin(\Omega/2), 0\}, \quad P_i = \{\cos(i/2), 0, 0, \sin(i/2)\}, \quad (31)$$

$$P_u = \{\cos(u_*/2), 0, \sin(u_*/2), 0\}$$

(Ω — долгота восходящего узла, i — наклонение орбиты, u_* — значение аргумента широты, соответствующее подспутниковой точке с координатами φ_*, λ_*).

Ориентация земной системы координат относительно трехгранника $X_G^* Y_G^* Z_G^*$ задается кватернионом

$$Q = \begin{bmatrix} \cos(\sigma/2) \\ \sin i \cos \varphi_* \sin(\sigma/2) \\ \cos i \cos \varphi_* \sin(\sigma/2) \\ \sin \varphi_* \sin(\sigma/2) \end{bmatrix}, \quad (32)$$

где $\sigma = U_3(t - t_0)$, U_3 — угловая скорость вращения Земли.

Взаимную ориентацию связанной с КА системы координат xuz и опорной координатной системы $X_G Y_G Z_G$ охарактеризуем кватернионом $N = \{v_0, v_1, v_2, v_3\}$. Компоненты этого кватерниона выражаются через параметры a_i ($i = 1, \dots, 8$) группы проективных преобразований (21) по формулам

$$\begin{aligned} v_0 &= 1/2[1 + (a_1 + a_5)/q + (a_1 a_5 - a_2 a_4)/q^2]^{1/2}, \\ v_1 &= F[a_8 + (a_1 a_8 - a_2 a_7)/q]/(4v_0 q), \\ v_2 &= -F[a_7 + (a_5 a_7 - a_4 a_8)/q]/(4v_0 q), \\ v_3 &= (a_2 - a_4)/(4v_0 q). \end{aligned} \quad (33)$$

Если в качестве «точного» кватерниона ориентации КА в инерциальном пространстве принять кватернион Λ_* , значения которого получаются численным интегрированием кинематических уравнений движения КА, то кватернион $\Lambda = P \circ Q \circ N$ определяет ту же ориентацию, но с точностью, зависящей от точности вычисления кватерниона N по предлагаемым выше алгоритмам.

Точность определения параметров ориентации КА охарактеризуем модулем μ вектора ориентации, связанного с кватернионом $M = \{\mu_0, \mu_1, \mu_2, \mu_3\} = \Lambda_* \circ \bar{\Lambda}$ соотношением

$$\mu = 2 \arcsin(\mu_1^2 + \mu_2^2 + \mu_3^2)^{1/2}. \quad (34)$$

Погрешность вычисления местоположения КА оценим евклидовой нормой δr вектора $\Delta r = r_E - r_E^*$, где r_E — радиус-вектор центра масс КА, вычисленный по выражениям (23); r_E^* — его точное значение, причем

$$r_E^* = \bar{\Lambda} \circ (r_0 - r_g) \circ \Lambda. \quad (35)$$

В равенстве (35) радиус-векторы $\mathbf{r}_0 = \{X_0, Y_0, Z_0\}$ и $\mathbf{r}_g = \{X_g, Y_g, Z_g\}$ центра масс КА и вершины координатной системы $X_G Y_G Z_G$ соответственно вычисляются в инерциальном пространстве по формулам

$$\begin{aligned} X_0 &= R_0 (\cos u \sin \Omega + \sin u \cos \Omega \cos i), & Y_0 &= R_0 \sin u \sin i, \\ Z_0 &= R_0 (\cos u \cos \Omega - \sin u \sin \Omega \cos i), \\ X_g &= R_3 \cos \varphi \sin \lambda, & Y_g &= R_3 \sin \varphi, & Z_g &= R_3 \cos \varphi \cos \lambda. \end{aligned}$$

Здесь $R_0 = R_3 + H_0$ — радиус орбиты, H_0 — ее высота, R_3 — радиус Земли.

Пусть спутник, находящийся в момент времени $t = t_0$ в режиме трехосной орбитальной ориентации, совершает управляемое движение, отслеживая оптической осью бортовой аппаратуры направление на точку земной поверхности с координатами φ_*, λ_* .

При моделировании динамики объекта и вычислении его параметров движения примем такие значения коэффициентов:

$$\begin{aligned} i &= 98^\circ, & \Omega &= 9^\circ, & \varphi_* &= 44^\circ 27', & \lambda_* &= 9^\circ 06', & u_* &= 45^\circ, & u_0 &= 39^\circ, \\ F &= 1 \text{ м}, & H_0 &= 400 \text{ км}, & Z_* &= 650 \text{ км}, & R_3 &= 6371 \text{ км}. \end{aligned}$$

В качестве точечных ориентиров используем четыре точки M_i со следующими заданиями координат в системе $X_G^* Y_G^* Z_G^*$ (км):

$$\begin{aligned} M_1 &= \{50; 0; 0,05\}, & M_2 &= \{0; 50; 0,1\}, \\ M_3 &= \{-50; 0; -0,02\}, & M_4 &= \{0; -50; -0,08\}. \end{aligned}$$

Предполагается, что погрешность алгоритма формирования измерений координат реперных точек на плоскости Π не превышает величины, эквивалентной разрешению r_p оптической системы на поверхности Земли.

Результаты моделирования приведены в таблице. Символ $r_p \sim 0$ означает, что информация о координатах отображений точечных ориентиров на плоскость Π не квантуется по уровню.

Рекуррентная процедура (30) прекращалась, когда изменение параметров ориентации на последующей итерации (оцениваемое по формуле, аналогичной (34)) не превышало $0,1''$.

Отметим, что для реализации предлагаемых алгоритмов не требуются специальным образом организованные движения КА; алгоритмы не накапливают погрешностей при вычислении параметров движения и, как следует из анализа результатов моделирования, при соответствующим образом выбранных параметрах оптической системы и точечных ориентиров обеспечивают высокую точность определения местоположения КА и его ориентацию.

Информация о взаимной ориентации трехгранников xuz и $x_1 y_1 z_1$ извлекается из сравнения параметров ориентации указанных трехгранников относительно опорной координатной системы XYZ , отнесенных к одному и тому же моменту времени. При этом никакая дополнительная информация об их взаимном положении (начальное приближение) не требуется.

Таблица

t, c	$r_p \sim 0$		$r_p = 1 \text{ м}$		$r_p = 5 \text{ м}$	
	$\mu,$ угл. с.	$\delta r, \text{ м}$	$\mu,$ угл. с.	$\delta r, \text{ м}$	$\mu,$ угл. с.	$\delta r, \text{ м}$
5	20,5	131,7	26,9	109,3	36,0	44,0
10	12,1	82,4	12,6	92,8	110,3	147,8
15	6,9	41,0	13,7	94,2	114,8	140,8
20	9,6	17,8	20,8	64,8	134,4	551,7
25	13,7	7,6	14,8	110,8	129,0	149,7
30	17,1	4,5	22,7	22,6	67,5	156,9
35	19,7	4,8	37,1	23,9	171,1	78,7
40	21,7	6,6	21,9	11,6	116,0	73,7
45	23,3	9,0	6,5	48,3	72,4	219,0
50	24,4	11,2	38,1	18,7	166,8	293,6
55	25,3	12,9	49,8	34,4	164,3	236,8
60	25,9	13,9	31,5	3,3	76,0	60,4
65	26,5	13,9	19,8	17,5	67,7	43,8
70	27,1	12,9	42,7	6,6	52,0	26,7
75	27,9	11,0	37,0	2,4	155,1	80,8
80	29,1	8,2	38,3	1,2	111,9	37,1
85	31,0	4,9	46,0	0,5	54,5	13,6
90	33,5	1,3	45,9	0,7	119,4	11,8
95	36,8	2,7	53,1	1,7	111,4	5,2
100	40,9	6,1	51,1	5,5	73,9	3,3

Заключение. Решена задача определения параметров взаимной ориентации приборных трехгранников, связанных с отдельными подсистемами бортового информационно-измерительного комплекса космического аппарата. Оценки упомянутых параметров предназначены для использования при определении точной пространственной ориентации установленного на КА оптико-электронного устройства (камеры) в процессе съемки земной поверхности, а также для точного преобразования измеряемого вектора угловой скорости в систему координат, связанную с камерой. Центральным моментом данной работы является определение ориентации камеры относительно приборного трехгранника астроизмерительной системы; при решении этой задачи сама камера используется как информационное устройство для наблюдения заданных наземных ориентиров.

Д.В. Лебедев, О.І. Ткаченко

КАЛІБРУВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНО-ВІМІРЮВАЛЬНОГО КОМПЛЕКСУ КОСМІЧНОГО АПАРАТА, ПРИЗНАЧЕНОГО ДЛЯ ЗЙОМКИ ЗЕМНОЇ ПОВЕРХНІ

Необхідною умовою одержання високоякісних знімків земної поверхні з космосу є високоточне визначення орієнтації знімальної камери у процесі зйомки. Для забезпечення такої точності мають бути відомі параметри взаємної орієнтації камери та блоків і підсистем, що входять до складу бортового вимірювального комплексу космічного апарата. У роботі показано, як згадані параметри можна знайти за спостереженнями заданих наземних орієнтирів. При цьому сама камера використовується як вимірювальний пристрій.

CALIBRATION OF ONBOARD DATAWARE COMPLEX OF SPACECRAFT FOR EARTH SURFACE IMAGING

High accuracy of determination of the imaging camera attitude is a necessary condition of obtaining the Earth surface high-quality snap-shots from the space. In order to ensure such accuracy, parameters of a mutual attitude of the camera, units and subsystems of the onboard measuring complex must be known. In this work it is shown how above-mentioned parameters can be found by means of assigned landmarks observation. In so doing the camera itself is used as a sensor.

1. *Лобанов А.Н.* Фотограмметрия. — М. : Недра, 1984. — 552 с.
2. *Fuchs A.F., Velez C.E., Goad C.C.* Orbit and attitude state recoveries from landmark data // *J. Astronaut. Sci.* — 1975. — **23**, N 4. — P. 369–381.
3. *Ивашкин В.В., Задыхина Л.И.* Анализ спутниковой автономной оптической навигации при визировании звезд и неизвестных наземных ориентиров // *Космические исследования.* — 1988. — **24**, вып. 6. — С. 846–854.
4. *Кирсанов А.П., Соловьев А.В.* Метод навигации по полю точечных ориентиров // *Изв. РАН. Техн. кибернетика.* — 1993. — № 4. — С. 148–156.
5. *Бакан Г.М.* Алгоритмы построения гарантированных и размытых эллипсоидальных оценок в линейных системах на основе метода наименьших квадратов // *Проблемы управления и информатики.* — 1995. — № 3. — С. 117–129.
6. *Лебедев Д.В., Ткаченко А.И.* Выставка бесплатформенной инерциальной системы с полной неопределенностью начальной ориентации приборного блока // *Там же.* — 2002. — № 5. — С. 118–126.
7. *Ткаченко А.И.* Определение ориентации и калибровка пространственного измерителя угловой скорости с использованием угловой информации // *Изв. АН СССР. Механика твердого тела.* — 1983. — № 3. — С. 19–23.
8. *Бранец В.Н., Шмыглевский И.П.* Применение кватернионов в задачах ориентации твердого тела. — М. : Наука, 1973. — 320 с.
9. *Артюшенко М.В.* Преобразования изображений в имитаторах визуальной обстановки самолетных тренажеров // *Кибернетика и вычисл. техника.* — 1972. — Вып. 15. — С. 31–40.
10. *Артюшенко М.В.* Основы синтеза алгоритмов визуального управления подвижным объектом // *Там же.* — 1994. — Вып. 104. — С. 37–44.
11. *Артюшенко М.В., Лебедев Д.В., Никитенко О.В.* Информационные технологии визуального управления. Часть 2. Математические модели. Синтез алгоритмов // *Проблемы управления и информатики.* — 2003. — № 1. — С. 129–142.
12. *Хартсхорн Р.* Основы проективной геометрии. — М. : Мир, 1970. — 160 с.
13. *Александров П.С.* Лекции по аналитической геометрии. — М. : Наука, 1968. — 911 с.

*Получено 20.05.2003
После доработки 27.10.2003*