УДК 629.7.05

А.И. Ткаченко

КОМБИНИРОВАННЫЙ АЛГОРИТМ ПОЛЕТНОЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ КАЛИБРОВКИ ПО НЕИЗВЕСТНЫМ МАРКЕРАМ

Ключевые слова: полетная геометрическая калибровка, наземные маркеры, камера, звездный датчик, комбинированный алгоритм, фотограмметрическое условие коллинеарности, фотограмметрическое условие компланарности, координатная привязка.

Под полетной геометрической калибровкой (кратко — калибровкой) оптико-электронного комплекса космического аппарата (КА) здесь подразумевается уточнение приближенно заданных параметров взаимной ориентации бортовой съемочной камеры и звездного датчика по наблюдениям наземных ориентиров (маркеров) с орбиты.

В [1] показана реальность и представлена схема решения задачи калибровки с использованием не менее чем двух разных снимков неизвестных наземных маркеров. Варианты алгоритмов решения упомянутой задачи приведены в [2–4].

Цель настоящей работы — обосновать и исследовать возможность повышения точности калибровки по незаданным маркерам посредством комбинированного использования двух сформулированных ранее алгоритмов.

Воспроизведем предположения и обозначения из [2, 4]. Пусть КА, несущий камеру, звездный датчик и аппаратуру GPS, движется по околоземной орбите над участком земной поверхности, на котором находятся визуально выразительные точечные маркеры. При этом камера выполняет несколько (не менее трех) снимков этого участка. Предположение, что местонахождение маркеров совершенно неизвестно, представляется гиперболизированно жестким. Скорее это местонахождение задано с невысокой точностью, позволяющей, однако, навести оптическую ось камеры на участок с маркерами и удерживать его в поле зрения камеры с помощью бортовой системы управления ориентацией КА. После получения, по крайней мере, двух снимков названного участка можно грубо оценить местоположение маркеров с точностью порядка 1–5 км [5]. Эта возможность здесь не используется в явной форме.

Свяжем со звездным датчиком ортонормированный базис 123 (далее — базис $\mathbf{E}$) с началом в месте нахождения перечисленных приборов, направив ось 3 по оптической оси датчика в сторону звездного неба. С камерой свяжем ортонормированный базис xyz (иначе — базис $\mathbf{K}$) с тем же началом и осью z, направленной по оптической оси камеры в сторону, противоположную объекту съемки. Со снимками, выполненными камерой, ассоциируются показания звездного датчика и бортовых часов. По этим показаниям определяется матрица направляющих косинусов C_{JE}, характеризующая ориентацию базиса $\mathbf{E}$ относительно связанного с Землей ортонормированного геоцентрического базиса $\mathbf{J}$, а аппаратура GPS показывает координаты КА в базисе $\mathbf{J}$. Представления физических векторов в названных базисах отмечаем соответствующими нижними индексами. Неопределенность взаимной ориентации базисов $\mathbf{K}$ и $\mathbf{E}$, характеризуемая незаданной матрицей направляющих косинусов C_{EK}, на момент начала калибровки имеет порядок $10' - 20'$. По окончании калибровки эта неопределенность должна быть сведена до уровня $10'' - 20''$.

Решение задачи калибровки приводится к оценке вектора малого поворота $\boldsymbol{\theta}_E = [\theta_1\ \theta_2\ \theta_3]^{\mathrm{T}} = \mathrm{const}$ (Т — символ транспонирования), фигурирующего в представлении $C^*_{EK} \approx [E_3 + \Phi(\boldsymbol{\theta}_E)]C_{EK}$, где C^*_{EK} — модельная (заданная) аппроксимация искомой матрицы C_{EK}; Φ — матрица оператора векторного умножения в конкретном базисе; E_3 — единичная 3×3-матрица.

Пусть из последовательных точек орбиты получено четное число N снимков некоторого неизвестного маркера M. Скомпонуем попарно снимки, выполненные из разных точек орбиты O_i, O_j, придерживаясь ограничения $i = 1,\ldots, N/2$, $j = N - i$. Тогда параметры пары снимков фактически оказываются функциями одного индекса i. Этот прием суживает возможности реализации вариантов, зато упрощает программирование и способствует улучшению обусловленности формируемых систем уравнений за счет дифференциации параметров двух снимков.

Обозначим: $\mathbf{e}_{iK}$, $\mathbf{e}_{iE} = [e_1\ e_2\ e_3]^{\mathrm{T}} = C_{EK}\mathbf{e}_{iK}$, $\mathbf{e}_{iJ} = C_{JE}\mathbf{e}_{iE}$ — представления единичного вектора прямой MO_i в соответствующих базисах; звездочкой отмечаем модельные (вычисленные) значения этих представлений, найденные, как в [2, 4], с использованием камеры, звездного датчика и сообщений GPS; $\mathbf{R}_i, \mathbf{R}_j$ — геоцентрические радиусы-векторы точек O_i и O_j; $\mathbf{r}$ — геоцентрический радиус-вектор точки M. Заимствуем из [4] приближенное представление

$$\mathbf{e}^*_{iJ} = \mathbf{e}_{iJ} + G_i\boldsymbol{\theta}_E, \tag{1}$$

где $G_i = -C_{JE}\Phi(\mathbf{e}_{iE})$. Из фотограмметрического условия коллинеарности [6] следует $\Phi(\mathbf{e}_{iJ})(\mathbf{r}_J - \mathbf{R}_{iJ}) = 0$. Опираясь на это выражение, запишем систему уравнений:

$$S_i\mathbf{r}_J = \begin{bmatrix} \Phi(\mathbf{e}_{iJ})\mathbf{R}_{iJ} \\ \Phi(\mathbf{e}_{jJ})\mathbf{R}_{jJ} \end{bmatrix},\ S_i = \begin{bmatrix} \Phi(\mathbf{e}_{iJ}) \\ \Phi(\mathbf{e}_{jJ}) \end{bmatrix}. \tag{2}$$

При оговоренных условиях матрица S_i имеет ранг 3. Следовательно, система (2) совместна и имеет единственное решение

$$\mathbf{r}_J = (S^{\mathrm{T}}_i S_i)^{-1}[\Phi^2(\mathbf{e}_{iJ})\mathbf{R}_{iJ} + \Phi^2(\mathbf{e}_{jJ})\mathbf{R}_{jJ}]. \tag{3}$$

В действительности в (2) вместо векторов $\mathbf{e}_{iJ}, \mathbf{e}_{jJ}$ используются их модельные аппроксимации вида (1). Поэтому вместо вектора $\mathbf{r}_J$ по формуле (3) находится его приближенное значение $\mathbf{r}^*_{iJ} = \mathbf{r}_J + \delta\mathbf{r}_{iJ}$, где $\delta\mathbf{r}_{iJ}$ — ошибка оценивания, удовлетворяющая формуле первого приближения,

$$\delta\mathbf{r}_{iJ} \approx \Psi_i\boldsymbol{\theta}_E,\ \Psi_i = (S^{\mathrm{T}}_i S_i)^{-1}S^{\mathrm{T}}_i \begin{bmatrix} \Phi(\mathbf{R}_{iJ})G_i \\ \Phi(\mathbf{R}_{jJ})G_j \end{bmatrix}. \tag{4}$$

Привлечем еще пару снимков объекта M из точек O_k, O_m, таких, что хотя бы одна из них не совпадает с какой-либо из точек O_i, O_j. На основании выражения $\mathbf{r}_J = (S^{\mathrm{T}}_k S_k)^{-1}[\Phi^2(\mathbf{e}_{kJ})\mathbf{R}_{kJ} + \Phi^2(\mathbf{e}_{mJ})\mathbf{R}_{mJ}]$, по структуре и символике подобного формуле (3), получим оценку $\mathbf{r}_{kJ}^*$ вектора $\mathbf{r}_J$ и по аналогии с (4) выражение $\delta\mathbf{r}_{kJ} \approx \Psi_k \boldsymbol{\theta}_E$ для ошибки этой оценки с очевидным смыслом обозначений. Уравнение измерений относительно $\boldsymbol{\theta}_E$ формируется в виде

$$\mathbf{r}_{iJ}^* - \mathbf{r}_{kJ}^* = (\Psi_i - \Psi_k)\boldsymbol{\theta}_E. \tag{5}$$

Это аналог формулы из [2]. Система уравнений (5), в общем случае несовместная, решается методом наименьших квадратов. Полученное решение $\boldsymbol{\theta}_E^*$ используется в формуле коррекции $C_{EK} \approx [E_3 - \Phi(\boldsymbol{\theta}_E^*)]C_{EK}^*$.

В рамках упрощенного анализа факторов, влияющих на точность калибровки по формуле (5), примем $C_{JE} \approx E_3$. Введем дополнительные обозначения: O° — точка пересечения оптической оси камеры с поверхностью Земли; s_1°, s_2° — смещения точки M относительно O° соответственно в направлениях осей 1 и 2 базиса $\mathbf{E}$; H° — расстояние между точками O° и O_i. При узком поле зрения камеры и относительно малых размерах участка с маркерами можно принять $|e_1| \approx s_2^\circ / H^\circ << 1, |e_2| \approx s_1^\circ / H^\circ << 1, e_3 \approx 1.$ Тогда, судя по структуре формул (1), (4) и (5), относительно малые значения параметра $|\theta_3|$ могут привести к не малым значениям $\mathbf{r}_{iJ}^* - \mathbf{r}_{kJ}^*$, т.е. координата θ_3 слабо наблюдаема [7]. При этом наблюдаемость названной координаты тем слабее, чем меньше значения $|e_1|, |e_2|$. Важно, что при наведении оптической оси камеры на участок с маркерами, отстоящий при съемках в стороне от трассы полета на достаточно большом расстоянии d, значение H° увеличивается. Следует ожидать, что при этом точность оценивания координаты θ_3 по формулам (5) снижается по сравнению с ситуацией $d = 0$.

Существенно, что при использовании уточненных параметров ориентации КА для координатной привязки неизвестных точечных объектов, находящихся в пределах относительно небольшого участка, неблагоприятное влияние даже больших остаточных ошибок θ_3 на точность привязки незначительно по сравнению с влиянием параметров θ_1, θ_2 [8]. С увеличением числа наблюдаемых маркеров и размеров участка, на котором они расположены, точность коррекции параметра θ_3 при фиксированном числе снимков должна заметно улучшаться, тогда как чувствительность оценки координат θ_1, θ_2 к названным показателям незначительна.

Умножим обе части системы уравнений (2) слева на шестиэлементную матрицу-строку $[\mathbf{e}_{jJ}^{\mathrm{T}}\ \mathbf{e}_{iJ}^{\mathrm{T}}]$. После преобразований получим

$$(\mathbf{R}_{iJ} - \mathbf{R}_{jJ})^{\mathrm{T}}[\Phi(\mathbf{e}_{iJ})\mathbf{e}_{jJ}] = 0. \tag{6}$$

Это формула фотограмметрического условия компланарности [6], вытекающая из фотограмметрического условия коллинеарности в результате выполненных выкладок. На основании условия компланарности в [3] получено уравнение измерений относительно $\boldsymbol{\theta}_E$ для алгоритма калибровки. Представим это уравнение в виде

$$(\mathbf{R}_{iJ} - \mathbf{R}_{jJ})^{\mathrm{T}}[\Phi(\mathbf{e}_{iJ}^*)\mathbf{e}_{jJ}^*] = (\mathbf{R}_{iJ} - \mathbf{R}_{jJ})^{\mathrm{T}}[\Phi(\mathbf{e}_{iJ}^*)G_j - \Phi(\mathbf{e}_{jJ}^*)G_i]\boldsymbol{\theta}_E. \tag{7}$$

 ISSN 0572-2691

Оценим возможности реализации алгоритма (7) в условиях, когда в процессе съемок участок с маркерами находится на трассе полета или в непосредственной близости от нее. При оговоренных предположениях базисные направления 1 и 3 базиса $\mathbf{E}$ практически параллельны плоскости орбиты, так же, как и векторы $\mathbf{e}_i, \mathbf{e}_j$. При наведении оптической оси камеры на маркеры ориентация КА в процесс съемки из разных точек O_i и O_j различается значениями тангажа — поворотом вокруг базисного направления 2, перпендикулярного плоскости орбиты. Поэтому с точностью, достаточной для последующего анализа,

$$C_{JE,i} \approx E_3 + \Phi(\mathbf{p}_i), \ \ C_{JE,j} \approx E_3 + \Phi(\mathbf{p}_j), \tag{8}$$

где $C_{JE,j}, C_{JE,i}$ — значения матрицы C_{JE} в точках O_i, O_j; $\mathbf{p}_i = [0 \ p_i \ 0]^{\mathrm{T}}$, $\mathbf{p}_j = [0 \ p_j \ 0]^{\mathrm{T}}$ — векторы, перпендикулярные плоскости отбиты; $0 < |p_i| < 1$, $0 < |p_j| < 1$. Так, если в сеансе съемок угол тангажа КА варьируется в пределах $\pm 30^\circ$, то ошибки аппроксимации в (8) не превышают 0,14. Из $C_{JE}\Phi(\mathbf{e}_{iE}) = \Phi(\mathbf{e}_{iJ})C_{JE}$ и формул (1), (8) выводим

$$\Phi(\mathbf{e}^*_{iJ})G_j - \Phi(\mathbf{e}^*_{jJ})G_i \approx \Phi(\mathbf{e}^*_{jJ})\Phi(\mathbf{e}^*_{iJ}) - \Phi(\mathbf{e}^*_{iJ})\Phi(\mathbf{e}^*_{jJ}) +$$
$$+ \Phi(\mathbf{e}^*_{jJ})\Phi(\mathbf{e}^*_{iJ})\Phi(\mathbf{p}_i) - \Phi(\mathbf{e}^*_{iJ})\Phi(\mathbf{e}^*_{jJ})\Phi(\mathbf{p}_j). \tag{9}$$

Присвоим вектору $\boldsymbol{\theta}_E$ значение $\boldsymbol{\theta}^\$_E = [0 \ \theta^\$_2 \ 0]^{\mathrm{T}}$, $\theta^\$ \neq 0$. Подставим выражение (9) в (7) и, учитывая $\Phi(\mathbf{p}_i)\boldsymbol{\theta}^\$_E = 0, \Phi(\mathbf{p}_j)\boldsymbol{\theta}^\$_E = 0$, проигнорируем составляющие полученной формулы, содержащие $\mathbf{p}_i$ и $\mathbf{p}_j$. С оставшимися членами уравнение (7) преобразуется к виду

$$(\mathbf{R}_{iJ} - \mathbf{R}_{jJ})^{\mathrm{T}}[\Phi(\mathbf{e}^*_{iJ})\mathbf{e}^*_{jJ}] = (\mathbf{R}_{iJ} - \mathbf{R}_{jJ})^{\mathrm{T}}[\boldsymbol{\theta}^\$_E \times (\mathbf{e}^*_{iJ} \times \mathbf{e}^*_{jJ})]. \tag{10}$$

Поскольку векторы $\boldsymbol{\theta}^\$_E$ и $\mathbf{e}^*_{iJ} \times \mathbf{e}^*_{jJ}$ перпендикулярны плоскости орбиты, их векторное произведение вместе с правой частью уравнения (10) равно нулю. По сказанному в [7] это означает, что при использовании неизвестных маркеров, расположенных вблизи трассы полета, координата θ_2 вектора $\boldsymbol{\theta}_E$ ненаблюдаема (на практике — слабо наблюдаема) по измерениям (7) и точность ее оценивания весьма чувствительна к возмущениям, например ошибкам первичной информации.

Если при калибровке по формуле (7) используются неизвестные маркеры, достаточно удаленные от трассы полета, то наведение оптической оси камеры на участок с маркерами достигается посредством варьирования крена и рыскания КА. При этом допущение (8), на котором основан вывод формул (9), (10), становится неправомерным вместе с названными формулами и наблюдаемость координаты θ_2 по измерениям (7) улучшается по сравнению с предыдущей ситуацией.

Выше показано, что точность алгоритма (5) уязвима при использовании неизвестных маркеров, удаленных в процессе съемок от трассы полета, а точность алгоритма (7) — при наблюдениях маркеров, близких к трассе. Структурная близость этих алгоритмов благоприятна для объединения их в единой вычислительной схеме для повышения результирующей точности. Это достигается путем последовательного учета доступных уравнений (5) и (7) в общей системе нормальных уравнений метода наименьших квадратов. В свете сказанного уместно при наземной обработке результатов съемки включать уравнения (7) в комбинированный алгоритм с весовым коэффициентом, тем большим, чем дальше участок с маркерами от трассы полета.

Изложенные соображения и выявленные эффекты хорошо согласуются с результатами компьютерного моделирования. Оно выполнялось по сценарию, близкому к схеме из [5, 8]. Имитировалось движение КА по слабоэллиптической орбите высотой около 670 км. Разновидности методов и условий реализовались как серии счета по 100 вариантов в каждой. В начале очередного варианта значения $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ задавались как нормально распределенные случайные величины со среднеквадратическими отклонениями $10'$. Случайные ошибки звездного датчика — центрированные гауссовы шумы со среднеквадратическими отклонениями 5, 5 и 12 секунд дуги. Это характеристики прибора типа БОКЗ-М60 при угловых скоростях КА, характерных для режима слежения за наземными маркерами [9]. На основании [10] гауссовым шумам GPS приписывалось вполне реалистичное среднеквадратическое отклонение 3 м [7]. Погрешности считывания координат изображений на чувствительной площадке камеры вводились как случайные величины, равномерно распределенные в пределах $\pm 9 \cdot 10^{-6}$ м. Два «неизвестных» маркера размещались на одной диагонали в вершинах квадратного участка со стороной 20 км. Выполнялось 12 снимков участка с маркерами, причем один снимок приходился на семь секунд полета. Между шестым и седьмым снимками отсчитывался дополнительный 18-секундный промежуток времени, свободный от съемок. В течение сеанса съемок тангаж КА изменялся от 30° до -30°. При наведении оптической оси камеры на маркеры, смещенные относительно трассы полета на расстояние $d = 300$ км, угол крена варьировался от 24° до $27{,}5^\circ$. Нумерация снимков при расчетах по формуле (5): $i = 1, \ldots, 6;\ j = 13 - i$. Для формулы (7) пары снимков составлялись по правилу $i = 1, \ldots, 6;\ j = i + 1, \ldots, 12$. Чтобы ослабить неблагоприятное воздействие ошибок звездного датчика, учитывались, как в [11], осредненные показания трех таких приборов. В процессе экспонирования оптическая ось камеры наводилась на окрестность середины отрезка, соединяющего оба используемых маркера, с точностью до ошибки, равномерно распределенной в диапазоне $\pm 1{,}4$ км. В [12] показано, что определенная симметрия расположения заданных маркеров относительно выбранной точки O° способствует повышению точности калибровки по наблюдениям таких маркеров.

В табл. 1 каждая строка содержит результаты одной из серий моделирования. В заглавной строке $M_{\theta 1}, M_{\theta 2}, M_{\theta 3}$ — оценки математических ожиданий остаточных координат $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ в секундах дуги после калибровки и коррекции; $\sigma_{\theta 1}, \sigma_{\theta 2}, \sigma_{\theta 3}$ — оценки среднеквадратических отклонений тех же координат в секундах дуги. Запись (5)+(7) в столбце «Алгоритм» указывает на совместное использование уравнений (5) и (7) с умножением последнего на весовой коэффициент 2 при $d = 0$ или на весовой коэффициент 10 при $d = 300$ км. Видно, что если формула (5) используется сама по себе, то ошибка оценивания координаты θ_3 оказывается доминирующей. В условиях обособленной реализации формулы (7) точность калибровки при $d = 300$ км выше, чем при $d = 0$. Комбинирование формул (5) и (7) в едином алгоритме показало повышение точности калибровки по сравнению с раздельным использованием этих формул.

 ISSN 0572-2691

Таблица 1

Алгоритм	d, км	$M_{\theta 1}$	$M_{\theta 2}$	$M_{\theta 3}$	$\sigma_{\theta 1}$	$\sigma_{\theta 2}$	$\sigma_{\theta 3}$
(5)	0	1,2	0,5	– 7,1	32,1	14,0	124
(7)	0	– 0,7	– 0,9	1,9	22,2	18,5	313
(5)+(7)	0	0,5	0,3	0,2	14,1	11,2	276
(5)	300	3,6	0,7	– 11,1	61,5	20,0	72,5
(7)	300	– 0,6	0	– 0,7	23,8	31,0	77,3
(5)+(7)	300	– 0,4	0,1	– 1,6	25,7	24,6	50,3

Дополнительная возможность повышения точности калибровки по формулам (5), (7) связана с изменением угла рыскания в процессе съемок посредством поворотов КА вокруг направления оптической оси камеры. Этот эффект объясняется варьированием коэффициентов e_1, e_2 в (1) между снимками или группами снимков. При этом применительно к алгоритму (7) естественно ожидать перераспределения уровней наблюдаемости и точности оценивания между координатами θ_1 и θ_2, так что вторая из них может корректироваться точнее, чем первая. Результаты реализации упомянутой возможности при моделировании выведены в табл. 2. В рамках модифицированного сценария моделирования первые шесть снимков участка с маркерами выполнилось при угле рыскания, близком к 15°. Затем на охарактеризованном выше 18-секундном промежутке, свободном от съемок, угол рыскания изменялся от 15° до -15° соответствующим поворотом КА вокруг оптической оси камеры — оси z. Затем выполнялось шесть оставшихся снимков с углом рыскания, близким к -15°. Точность коррекции, показанная в табл. 2, в целом явно выше, чем в табл. 1, с учетом сформулированного выше замечания о влиянии параметра θ_3 на точность последующей координатной привязки.

Таблица 2

Алгоритм	d, км	$M_{\theta 1}$	$M_{\theta 2}$	$M_{\theta 3}$	$\sigma_{\theta 1}$	$\sigma_{\theta 2}$	$\sigma_{\theta 3}$
(5)	0	2,8	1,8	12,5	17,1	12,8	87,7
(7)	0	– 1,9	0	7,2	17,8	15,9	63,1
(5)+(7)	0	2,6	0,9	– 7,2	13,1	11,6	126
(5)	300	2,7	3,7	2,8	18,2	11,9	61,8
(7)	300	– 3,0	0,3	– 1,5	26,1	8,9	52,4
(5)+(7)	300	4,6	– 0,1	12,6	17,0	9,1	44,9

Результаты моделирования подтверждают сказанное выше о зависимости точности калибровки от числа наблюдаемых маркеров.

Итак, сочетание формул (5) и (7) в схеме комбинированного алгоритма полетной геометрической калибровки действительно открывает возможности для усиления достоинств и компенсации недостатков обеих составных частей упомянутого алгоритма и позволяет ослабить влияние возмущающих факторов на точность полетной геометрической калибровки. Как видно из сравнения табл. 1 с табл. 2, прием поворота КА вокруг оптической оси камеры на этапе полета, свободном от съемок, в случае возможности его применения способствует повышению точности калибровки. Доступная точность калибровки и коррекции существенно зависит от тактики съемок и алгоритмической обработки снимков и сопровождающей информации. Дальнейшего повышения точности калибровки можно достигнуть посредством съемки нескольких участков с неизвестными наземными маркерами, как в [4].

О.І. Ткаченко

КОМБІНОВАНИЙ АЛГОРИТМ ПОЛЬОТНОГО ГЕОМЕТРИЧНОГО КАЛІБРУВАННЯ ЗА НЕВІДОМИМИ МАРКЕРАМИ

Розглянуто можливість поліпшення точності польотного геометричного калібрування оптико-електронного комплексу космічного апарата шляхом поєднання двох різних алгоритмів, призначених для калібрування за знімками невідомих наземних маркерів.

Ключові слова: польотне геометричне калібрування, наземні маркери, камера, зоряний давач, комбінований алгоритм, фотограмметрична умова колінеарності, фотограмметрична умова компланарності, координатна прив'язка.

A.I. Tkachenko

A COMBINED ALGORITHM OF THE IN-FLIGHT GEOMETRIC CALIBRATION USING UNKNOWN LANDMARKS

A possibility for accuracy improvement of in-flight geometric calibration of the spacecraft's optical-electronic complex by means of unification of two different algorithms intended for calibration using snapshots of unknown landmarks is considered.

Keywords: in-flight geometric calibration, landmarks, camera, star tracker, combined algorithm, photogrammetric condition of collinearity, photogrammetric condition of coplanarity, geo-referencing.

1. Пятак И.А. Выбор принципов координатной привязки космических снимков. *Космическая техника. Ракетное вооружение.* 2010. Вып. 2. С. 100–107.
2. Ткаченко А.И. О полетной юстировке оптико-электронного комплекса космического аппарата. *Известия РАН. Теория и системы управления.* 2013. № 6. С. 122–130. DOI: 10.7868/S0002338813060127.
3. Лебедев Д.В. Полетная геометрическая калибровка оптико-электоронной аппаратуры космического аппарата наблюдения Земли по неизвестным ориентирам. *Международный научно-технический журнал «Проблемы управления и информатики».* 2013. № 5. С. 114–125.
4. Ткаченко А.И. Усовершенствование методики полетной геометрической калибровки с использованием неизвестных наземных ориентиров. *Международный научно-технический журнал «Проблемы управления и информатики».* 2017. № 2. С. 112–121.
5. Ткаченко А.И. О координатной привязке наземных объектов по космическим снимкам. *Космічна наука і технологія.* 2015. Т. 21. № 2. С. 65–72.
6. Лобанов А.Н. Фотограмметрия. М.: Недра. 1984. 552 с.
7. Potapenko Ye.M. Simplified linear-system restorability and controllability criteria and their application in robotics. *J. of Automation and Information Sciences.* Begell House Inc. Publishers. 1996. V. 27, N 5&6. P. 146–151.
8. Ткаченко А.И. Координатная привязка наземных объектов по неточным космическим снимкам. *Международный научно-технический журнал «Проблемы управления и информатики».* 2016. № 4. С. 116–123.
9. Сравнительные характеристики звездных датчиков ориентации семейства БОКЗ. http://ofo.ikiweb.ru/bokz_table.php
10. Точность ГЛОНАСС повысят в два раза до конца текущего года. http://izvestia.ru/news/585537
11. Ткаченко А.И. К задаче полетной геометрической калибровки по неизвестным ориентирам. *Международный научно-технический журнал «Проблемы управления и информатики».* 2014. № 1. С. 129–138.

12. Ткаченко А.И. Селекция маркеров при полетной геометрической калибровке. *Международный научно-технический журнал «Проблемы управления и информатики».* 2018. № 1. С. 104–109.

Получено 05.03.2018
После доработки 11.09.2018