

УДК 629.78

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ АЛГОРИТМА ПОЛЁТНОЙ ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКОЙ КАЛИБРОВКИ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ПО ЗВЁЗДАМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФИЛЬТРА КАЛМАНА

© 2013 В. В. Каменский, В. Ф. Петрищев

ФГУП ГНПРКЦ «ЦСКБ-ПРОГРЕСС», г. Самара

Разработан алгоритм полётной фотограмметрической калибровки оптико-электронной аппаратуры дистанционного зондирования Земли по звёздам с использованием фильтра Калмана в предположении, что ориентация КА в процессе съёмки звёздного неба известна с высокой точностью. Алгоритм разработан с использованием только линейных величин, получаемых в результате проектирования звёздной сферы на фокальную плоскость.

Дистанционное зондирование Земли, оптико-электронный преобразователь, оптико-электронная аппаратура, фильтр Калмана, главная точка изображения, матрица, объектив телескопа.

В работе [1] решена задача оценивания элементов внутреннего ориентирования (ЭВНО) оптико-электронной аппаратуры (ОЭА) в предположении отсутствия относительного смещения матриц чувствительных приборов с зарядной связью (ФПЗС), что позволило применить метод наименьших квадратов. В работе [2] задача оценивания ЭВНО ОЭА по снимкам звёздного неба совмещена с оцениванием смещений матриц ФПЗС.

С целью повышения точности определения ЭВНО необходимо дополнительно оценивать и учитывать для каждой матрицы ФПЗС, входящей в оптико-электронный преобразователь (ОЭП), параметры её смещения от заданного положения. Такими параметрами являются: две линейные координаты смещения её центра и угол поворота в фокальной плоскости. Таким образом, для каждой матрицы необходимо дополнительно оценивать три параметра.

Применительно к космическому аппарату (КА) «Ресурс-П», имеющему в составе ОЭП 36 матриц ФПЗС, необходимо кроме шести параметров ЭВНО (две координаты главной точки изображения (ГТИ), три параметра дисторсии и фокусное расстояние) дополнительно оценивать ещё $36 \times 3 = 108$ параметров матриц. Таким

образом, для КА оценке подлежит расширенный вектор состояния, содержащий 114 параметров.

Применение метода наименьших квадратов в этом случае сопряжено с большой длительностью вычислительного процесса, связанного с необходимостью обращать матрицу нормальных уравнений размерности 114×114 .

В работе разработана модель алгоритма оценивания искомого вектора состояния на основе фильтра Калмана, не требующего обращения матрицы большой размерности.

Модель алгоритма разработана в предположении, что ориентация КА при сканировании звёздного неба уточнена с высокой точностью ($2'' - 5''$) на основе послеполётной обработки информации, получаемой со звёздных датчиков, работающих в режиме съёмки звёздного неба. Предполагается, что в соответствии с уточнёнными данными об ориентации пересчитаны координаты звёзд, измеренных по снимку звёздного неба.

Пусть S_i ($i=1,2,\dots,n$) – i -я экспонированная на каком-либо такте съёма информация с ОЭП и опознанная звезда. Тогда $\bar{r}_i = [x_i, y_i]^T$ – расчётный вектор направления на неё из начала визирной (прибор-

ной) системы координат $Oxyz$ ОЭА, T -операция транспонирования. Координата x_i этого вектора определяется по номеру матрицы ФПЗС, номеру столбца этой матрицы с экспонированной звездой, линейному размеру пикселя d_x . Координата y_i определяется положением считывающего регистра матрицы ФПЗС с экспонированной звездой в системе координат $Oxyz$. В соответствии с рис.1 измеренный вектор \tilde{r}_i можно представить в виде следующей суммы векторов:

$$\tilde{r}_i = \Delta r_{i0} + \bar{r}_i + \Delta r_{i1} + \Delta r_{i2}.$$

Здесь $\Delta r_0 = [\Delta x_0, \Delta y_0]^T$ определяет положение проекции на фокальную плоскость задней узловой точки объектива, называемой главной точкой изображения объектива ОЭА и обозначаемой буквой А.

$\bar{r}_i = [x_i, y_i]^T$ определяет расчётное положение относительно ГТИ i -й экспонированной звезды S_i (здесь находилась бы i -я звезда, если бы все другие фотограмметрические параметры, кроме отклонения Δr_0 , были равны нулю). Вектор Δr_{i1} есть сумма двух векторов, отсчитываемых в меридианальном (по вектору \bar{r}_i) направлении:

$$\Delta r_{i1} = a_1 \bar{r}_i + (a_3 r_i^2 + a_5 r_i^4 + a_7 r_i^6) \bar{r}_i.$$

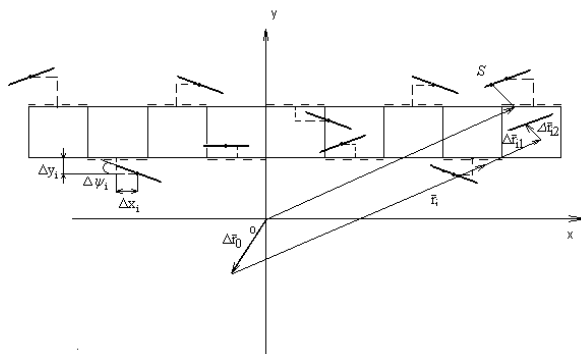


Рис. 1. Схема измерений

Первый из них учитывает отклонение фотограмметрического фокусного расстояния от его паспортного значения f , а второй – величину меридианальной фотограмметрической дисторсии, аппроксимируемой полиномом нечётных степеней радиальной координаты \bar{r}_i , отсчитываемой от ГТИ (a_1, a_3, a_5, a_7 – малые величины, r_i – модуль вектора \bar{r}_i). Вектор Δr_{i2} учитывает линейные смещения центра i -й матрицы и её угловой поворот в фокальной плоскости.

Запишем невязку – разность между измеренным и расчётным векторами направления на звезду S_i :

$$\Delta \tilde{\Theta}_i = \tilde{r}_i - \bar{r}_i = \begin{bmatrix} \tilde{x}_i - x_i \\ \tilde{y}_i - y_i \end{bmatrix};$$

$$\Delta \tilde{\Theta}_i = \Delta r_{i0} + \Delta r_{i1} + \Delta r_{i2},$$

где \tilde{x}_i, \tilde{y}_i – измеренные по снимку координаты i -й звезды, x_i, y_i – её расчётные координаты.

Следовательно, невязка определяется значениями фотограмметрических параметров и при нулевых значениях этих параметров равна нулю.

Постоянный вектор оцениваемых параметров в этом случае имеет вид:

$$\Delta \bar{q} = \begin{bmatrix} \Delta x_0, \Delta y_0, a_1, a_3, a_5, a_7, \Delta x_1, \Delta y_1, \Delta \Psi_1, \dots \\ \Delta x_i, \Delta y_i, \Delta \Psi_i, \dots, \Delta x_{36}, \Delta y_{36}, \Delta \Psi_{36} \end{bmatrix}^T,$$

где $\Delta x_i, \Delta y_i, \Delta \Psi_i$ ($i = 1, 2, \dots, 36$) – линейные и угловые смещения i -й матрицы ФПЗС, T – знак операции транспонирования.

Двумерный вектор невязок звёзд (отклонений от расчётных значений измеренных координат звёзд относительно главной точки изображения) можно представить в виде линейной функции искомого вектора состояния:

$$\Delta \tilde{\Theta}_i = W_i \cdot \Delta \bar{q} = \begin{bmatrix} \bar{W}_1^T \\ \bar{W}_2^T \end{bmatrix}_i \cdot \Delta \bar{q}.$$

Элементы матрицы производных W_i размерности 2×114 являются функциями результатов измерений с номером j координат i -й звезды на j -м шаге работы фильтра:

$$\bar{W}_{1i}^T = \begin{bmatrix} 1; 0; \tilde{x}; \tilde{r}^2 \tilde{x}; \tilde{r}^4 \tilde{x}; \tilde{r}^6 \tilde{x}; w_{11}; w_{12}; w_{13}; \dots; \\ w_{1i_1}; w_{1i_2}; w_{1i_3}; \dots; w_{136_1}; w_{136_2}; w_{136_3} \end{bmatrix},$$

$$\bar{W}_{2i}^T = \begin{bmatrix} 0; 1; \tilde{y}; \tilde{r}^2 \tilde{y}; \tilde{r}^4 \tilde{y}; \tilde{r}^6 \tilde{y}; w_{21}; w_{22}; w_{23}; \dots; \\ w_{2i_1}; w_{2i_2}; w_{2i_3}; \dots; w_{236_1}; w_{236_2}; w_{236_3} \end{bmatrix}.$$

В силу функциональной зависимости результатов измерений координат звёзд от смещения матриц в общем случае имеют место следующие соотношения:

$$\begin{aligned} w_{11} = \dots = w_{1i_1} = \dots = w_{136_1} &= 1; \\ w_{12} = \dots = w_{1i_2} = \dots = w_{136_2} &= 0; \\ w_{13} = \dots = w_{1i_3} = \dots = w_{136_3} &= 0; \\ w_{21} = \dots = w_{2i_1} = \dots = w_{236_1} &= 0; \\ w_{22} = \dots = w_{2i_2} = \dots = w_{236_2} &= 1; \\ w_{23} = I_1; \dots; w_{2i_3} = I_i; \dots; w_{236_3} &= I_{36}, \end{aligned}$$

где λ_i ($i = 1, 2, \dots, 36$) – координата звезды вдоль считывающего регистра i -й матрицы ФПЗС, отсчитываемая относительно центра матрицы.

В этих соотношениях i -й момент времени определяется моментом регистрации хотя бы одной S_i звезды какой-либо матрицей ФПЗС. При этом значения производных матрицы W_i для данной матрицы ФПЗС имеют приведенные значения. Значения производных для других матриц ФПЗС, которые не регистрировали

звёзд, принимаются на i -м шаге равными нулю.

Метод Калмана сводится к следующей последовательности шагов вычислений:

$$\Delta \hat{q}_i = \Delta \hat{q}_{i-1} + \bar{P}_i \cdot \left(\Delta \tilde{\Theta}_i - \bar{W}_i \cdot \Delta \hat{q}_{i-1} \right);$$

$$\bar{P}_i = K_{q,i-1} \cdot \bar{W}_i^T \cdot [\bar{W}_i \cdot K_{q,i-1} \cdot \bar{W}_i^T + K_q]^{-1};$$

$$K_{q,i} = K_{q,i-1} - \bar{P}_i \cdot \bar{W}_i \cdot K_{q,i-1};$$

$$K_q = \begin{bmatrix} S^2 & 0 \\ 0 & S^2 \end{bmatrix}.$$

Здесь \bar{P}_i – оптимальный весовой вектор, для вычисления которого образуется матрица размерности 2×2 ; $\Delta \tilde{\Theta}_i$ – двумерный вектор невязок звёзд; $K_{q,i}$ – корреляционная матрица погрешностей оценок, уточняемая на каждом шаге работы фильтра; K_q – матрица погрешностей измерений координат x и y звёзд на снимке звёздного неба.

В качестве начального значения оцениваемого вектора состояния $\Delta \bar{q}$, как правило, принимается нулевой вектор. Начальное значение корреляционной матрицы погрешностей оценок принимается в виде диагональной матрицы, диагональные элементы которой равны дисперсиям погрешностей знания параметров вектора состояния.

Для моделирования изложенной задачи была составлена и отлажена программа на ПЭВМ.

Результаты моделирования алгоритма определения ЭВнО ОЭА ДЗЗ по звёздам с помощью фильтра Калмана приведены на рис. 2-6.

В процессе моделирования оценивалась погрешность определения оценивае-

мых параметров в зависимости от количества N зарегистрированных звёзд и среднеквадратической величины S погрешности измерений координат звёзд в фокальной плоскости оптико-электронной аппаратуры, вызванной погрешностями ориентации изделия по всем трём осям. В качестве погрешности оценки параметра принималось среднеквадратическое отклонение, полученное из диагонального элемента корреляционной матрицы $K_{q,i}$, соответствующего оцениваемому параметру.

На рис. 4, 5 и 6 в качестве N принималось количество звёзд, зарегистрированных одной матрицей ФПЗС.

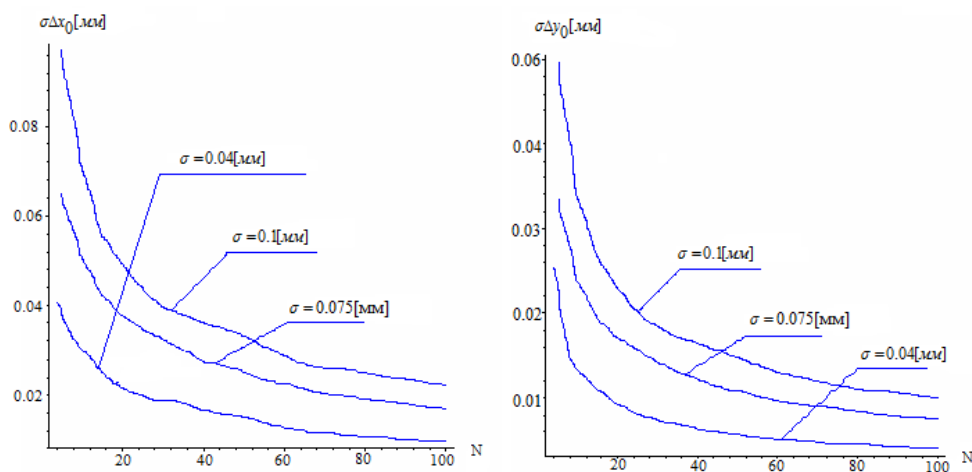


Рис. 2. Результаты оценивания координат ГТИ $\Delta x_0, \Delta y_0$

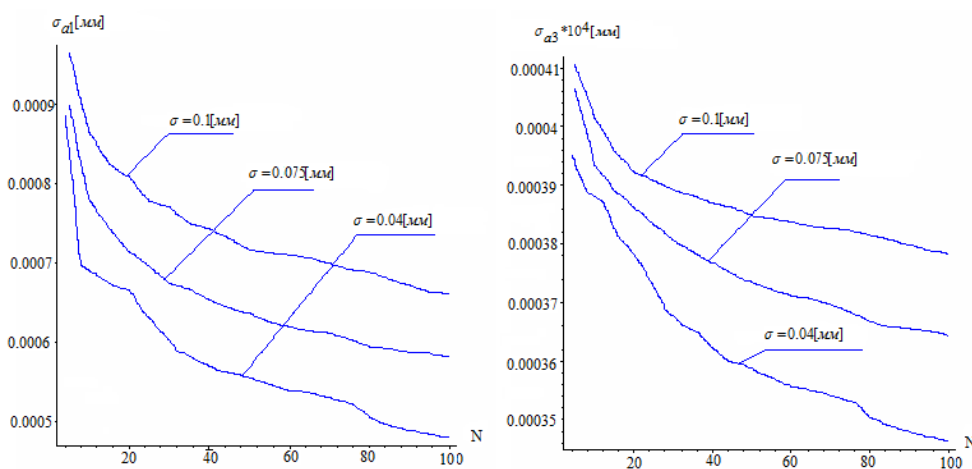


Рис. 3. Результаты оценивания коэффициента фокусного расстояния $a1$ и коэффициента дисторсии $a3$

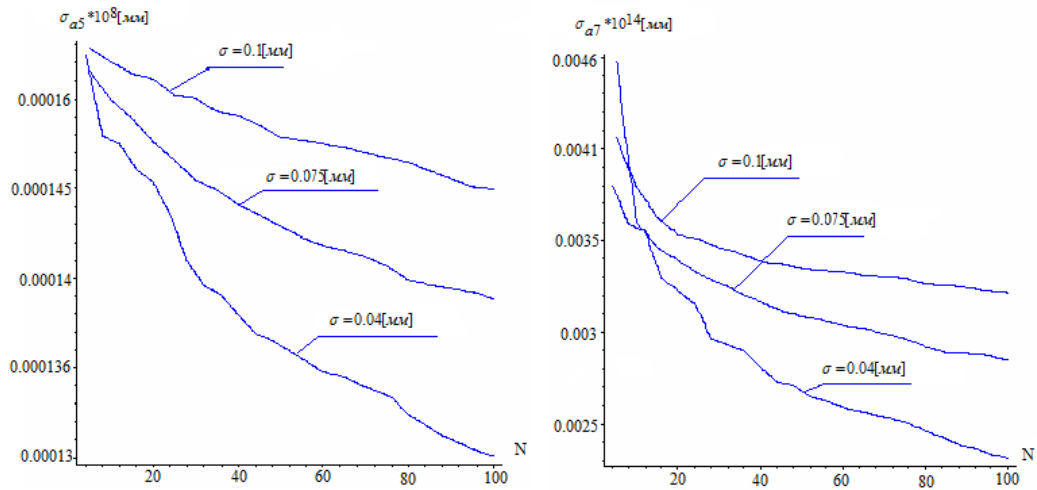


Рис. 4. Результаты оценивания коэффициентов дисперсии a_5, a_7

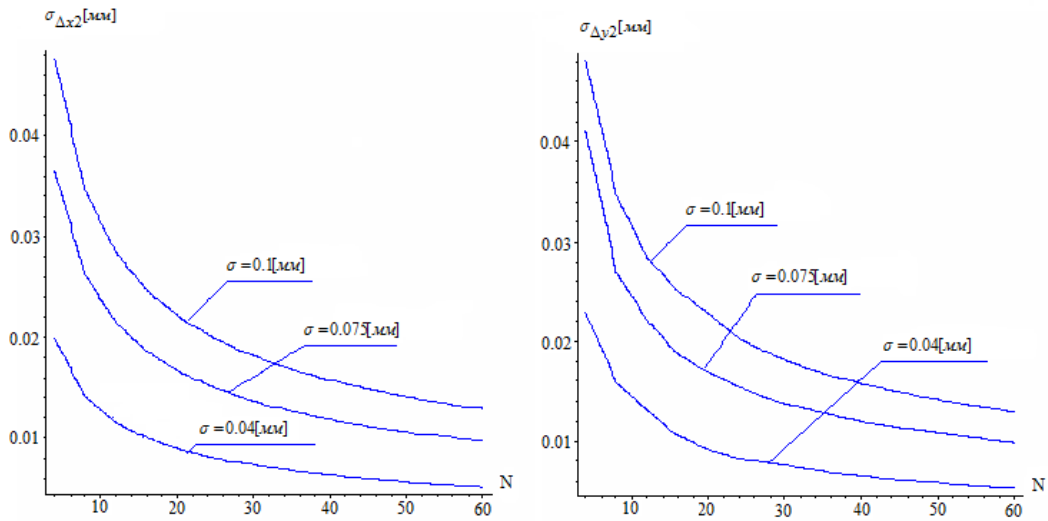


Рис. 5. Результаты оценивания величин линейных смещений матриц ФПЗС

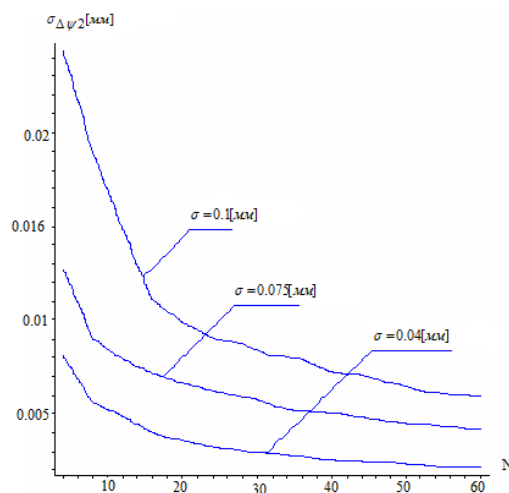


Рис. 6. Результаты оценивания величин углов поворота матриц ФПЗС

В результате моделирования установлено:

–на результаты оценок существенно влияют погрешности знания ориентации КА в инерциальном пространстве;

–для оценивания параметров, определяющих положение матриц ФПЗС, необходимо от 20 до 30 звёзд на одну матрицу;

–оценивание координат положения ГТИ производится при наличии 60-80 звёзд;

–для оценивания фокусного расстояния и параметров дисторсии достаточно 80-100 звёзд.

Важно отметить, что возможность оценивания координат главной точки изображения связана с возможностью эквивалентного представления этих координат систематиче-

скими погрешностями ориентации КА по двум каналам: тангажа и крена.

Библиографический список

1. Петрищев, В.Ф. Полётная фотограмметрическая калибровка оптико-электронной аппаратуры дистанционного зондирования Земли по звёздному небу [Текст] / В.Ф. Петрищев // Полёт, 2005. – №7. – С.39-42.

2. Каменский, В.В. Алгоритм полётной фотограмметрической калибровки оптико-электронной аппаратуры ДЗЗ по звёздам с использованием фильтра Калмана [Текст]/ В.В. Каменский, В.Ф. Петрищев // Актуальные проблемы ракетно-космической техники (II Козловские чтения). – 2011. – С. 218-219.

RESULTS OF SIMULATING AN ALGORITHM OF FLIGHT PHOTOGRAMMETRIC CALIBRATION OF ELECTROOPTICAL EQUIPMENT FOR STELLAR EARTH REMOTE SENSING USING THE KALMAN FILTER

© 2013 V. V. Kamensky, V. F. Petrishchev

Space Rocket Center «TsSKB-Progress», Samara

An algorithm of flight photogrammetric calibration of electrooptical equipment for stellar Earth remote sensing using the Kalman filter is developed assuming that the vehicle orientation in the course of the sky survey is known with split-hair accuracy. The algorithm is developed using only the linear magnitudes obtained as a result of projecting the star sphere on a focal plane.

Earth remote sensing, electrooptical converter, Kalman filter, principal point of an image, matrix, telescope objective.

Информация об авторах

Каменский Владимир Вячеславович, инженер-конструктор, ФГУП ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс». E-mail: csdb@samspace.ru. Область научных интересов: получение и обработка информации.

Петрищев Владимир Фёдорович, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, ФГУП ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс». E-mail: csdb@samspace.ru. Область научных интересов: системы навигации и управления движением, получение и обработка информации.

Kamensky Vladimir Vyacheslavovich, design engineer, Samara Space Rocket Centre «TsSKB-Progress». E-mail: csdb@samspace.ru. Area of research: data acquisition and processing.

Petrishchev Vladimir Fyodorovich, leading research associate, Samara Space Rocket Centre «TsSKB-Progress», doctor of engineering. E-mail: csdb@samspace.ru. Area of research: navigation and traffic control systems, data acquisition and processing.