

Дальше этапы 2—6 повторяются, провоцируя друг друга. Это повторение кажется бесконечным, и возникает вопрос о том, что могло бы его остановить. С увеличением перепада температуры ΔT потребление системой энергии достигает достаточно высоких значений. Следовательно, и плотность потока энергии к центру системы значительно возрастает. А из соотношения (2) очевидно, что и плотность вещества в системе увеличивается. Следствие изменения плотности вещества — изменение его структуры, а значит, и физических свойств (тепло- или электропроводности) [1].

В результате потребление системой тепловой или электрической энергии может быть ограничено благодаря изменению структуры и свойств составляющего ее вещества и получению нового вещества с новыми свойствами.

1. Говертон М. Т. Термодинамика для инженеров. — М.: Металлургия, 1966.

2. Коленко Е. А. Термоэлектрические охлаждающие приборы. — М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1963.
3. Политехнический словарь / Под ред. А. Ю. Ишлинский. — М.: Сов. энциклопедия, 1980.
4. Прямое преобразование энергии / Под ред. С. В. Тимашева, Е. Н. Янтовского. — М.: Мир, 1969.
5. Савельев И. В. Курс общей физики — М.: Наука, 1987.—Т. 1.

ON ELABORATION OF NEW TECHNOLOGIES DEVELOPMENT ON THE BASIS OF NOTIONS OF THE INFLUENCE OF ENERGY FLOW ON FORMING ANISOTROPIC DENSITY OF CONSTRUCTIVE MATERIALS

V. A. Domracheva, V. A. Ladikov

We found the relation between the energy flow density and the material density in the system, as well as we determined the nature of this relation. In our opinion, the relation can be used for elaboration of new materials and technologies.

УДК 629.76/.78.062.02:778

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ОБЪЕКТОВ ПО КОСМИЧЕСКИМ СНИМКАМ

© Р. С. Дымарчук, Г. А. Борщева, Е. Д. Ярмольчук

Державне конструкторське бюро «Південне»

Пропонується методика розрахунку похибок географічних координат об'єкта та його координат у напрямку дотичної і бінормалі до орбіти за космічними знімками поверхні Землі, що не містять реперних точок. Враховується дія похибок вимірювання чи прогнозування положення центра мас КА, конструктивних похибок КА, похибок вимірювання кутів орієнтації КА. Наводиться приклад розрахунку похибок для космічної системи «Січ-2».

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

При решении различных практических задач использования снимков заданных участков поверхности Земли, полученных съемочной аппаратурой космического аппарата, возникает необходимость координатной привязки снятых объектов.

Координатная привязка позволяет определить координаты любого объекта (цели) на полученном снимке заданного участка поверхности.

Достижимое значение точности привязки снятых объектов является одним из важных показателей целевой эффективности космической системы наблюдения Земли [2].

Если снимок содержит достаточное количество

опознанных объектов (реперных точек), координаты которых априорно известны, то возможно изменение положения исследуемого объекта относительно этих опознанных объектов и вычисление его относительных координат. Далее не представляет сложности рассчитать и абсолютные (географические) координаты цели.

В случае, когда снимок не содержит таких реперных точек или их число и расположение не позволяют осуществить привязку цели с приемлемой точностью, используется метод координатной привязки по элементам внешнего ориентирования снимающего прибора при съемке и положению цели на снимке. В дальнейшем предполагаем, что съемка осуществляется мгновенной экспозицией всего кад-

ра, а наведение снимающего прибора — соответствующей ориентацией КА.

Элементами внешнего ориентирования (ЭВО) являются параметры, характеризующие положение центра масс КА в пространстве, его ориентацию вокруг центра масс и ориентацию снимающего прибора относительно КА.

Положение центра масс КА в момент съемки задается в гринвичской системе (ГСК) координат и может быть определено бортовыми навигационными средствами КА или спрогнозировано по результатам траекторных измерений наземными станциями. Ориентация КА вокруг центра масс задается положением осей связанной системы координат (ССК) в орбитальной системе координат (ОСК) и определяется бортовой индикационной системой углового положения КА. Ориентация снимающего прибора относительно базовых осей КА задается положением осей оптической системы с фотоприемной структурой снимающего прибора в базовой системе координат (БСК), номинальные направления осей которой совпадают с направлениями осей ССК (рис. 1), и определяется при установке прибора на КА.

Знание ЭВО дает возможность установить взаимно однозначное соответствие между координатами точек на поверхности Земли и на снимке с помощью уравнений связи.

Задача определения по ЭВО съемочной аппаратуры номинальных значений координат снятого объекта, находящегося на поверхности Земли, в общем виде решена в работе [1]. Там предложена рациональная последовательность расчета координат снятого объекта, однако оставлен открытый вопрос расчета коэффициента пропорциональности, являющейся связующим звеном между координатами объекта на снимке и на поверхности Земли.

Данная работа использует результаты, изложенные в [1] и является продолжением исследований в направлении построения полной модели расчета, включающей расчет названного коэффициента пропорциональности.

В связи с тем, что имеется ряд факторов, которые не позволяют осуществить безошибочное определение ЭВО, точно определить по снимку координаты объектов не представляется возможным. В связи с этим представляет интерес численная оценка влияния погрешностей определения ЭВО на точность координатной привязки объектов.

На погрешности определения координат объектов на снимке будут оказывать влияние следующие погрешности определения ЭВО:

а) погрешности измерения (или прогнозирования) координат центра масс КА;

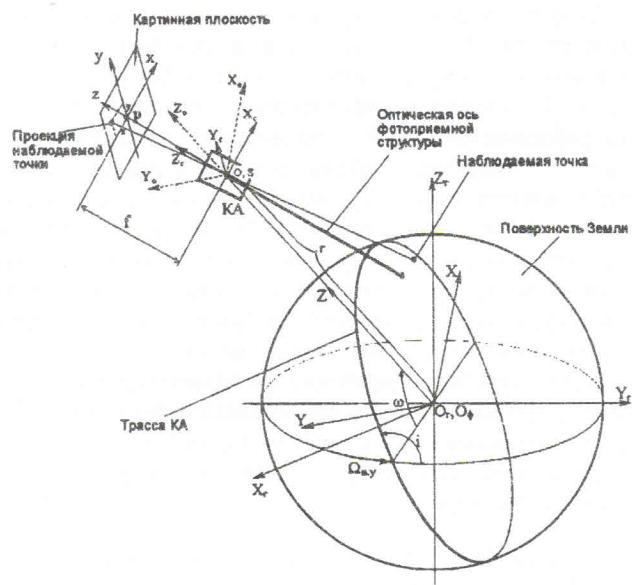


Рис. 1. Используемые системы координат. S — центр проецирования, r — радиус-вектор космического аппарата, f — фокусное расстояние снимающего прибора, $\Omega_{\text{вн}}$ — долгота восходящего узла орбиты космического аппарата, i — наклонение плоскости орбиты, ω — аргумент широты космического аппарата, p_{xyz} — система координат фотоприемной структуры, $O_c X_c Y_c Z_c$ — связанная система координат, $O_\phi X_\phi Y_\phi Z_\phi$ — орбитальная система координат: $O_\phi X_\phi Y_\phi Z_\phi$ — фотограмметрическая система координат, $O_g X_g Y_g Z_g$ — гринвичская система координат

б) погрешности измерения углов ориентации КА индикационной системой углового положения;

в) погрешности углового положения оптической системы с фотоприемной структурой снимающего прибора относительно БСК.

Как правило, приведенные погрешности можно считать малыми независимыми случайными величинами, подчиняющимися нормальному закону распределения, и имеющими нулевые математические ожидания.

Настоящая работа посвящена разработке инженерной методики расчета достижимой точности определения координат объектов по космическим снимкам с учетом ограниченной точности измерения ЭВО снимающего прибора.

Решается задача определение следующих точностных характеристик:

1) суммарных предельных $\Delta\lambda_\Sigma$ и $\Delta\delta_\Sigma$ погрешностей определения географических координат объекта;

2) суммарных предельных ΔX и ΔY погрешностей определения координат объекта в направлениях касательной и бинормали к трассе КА.

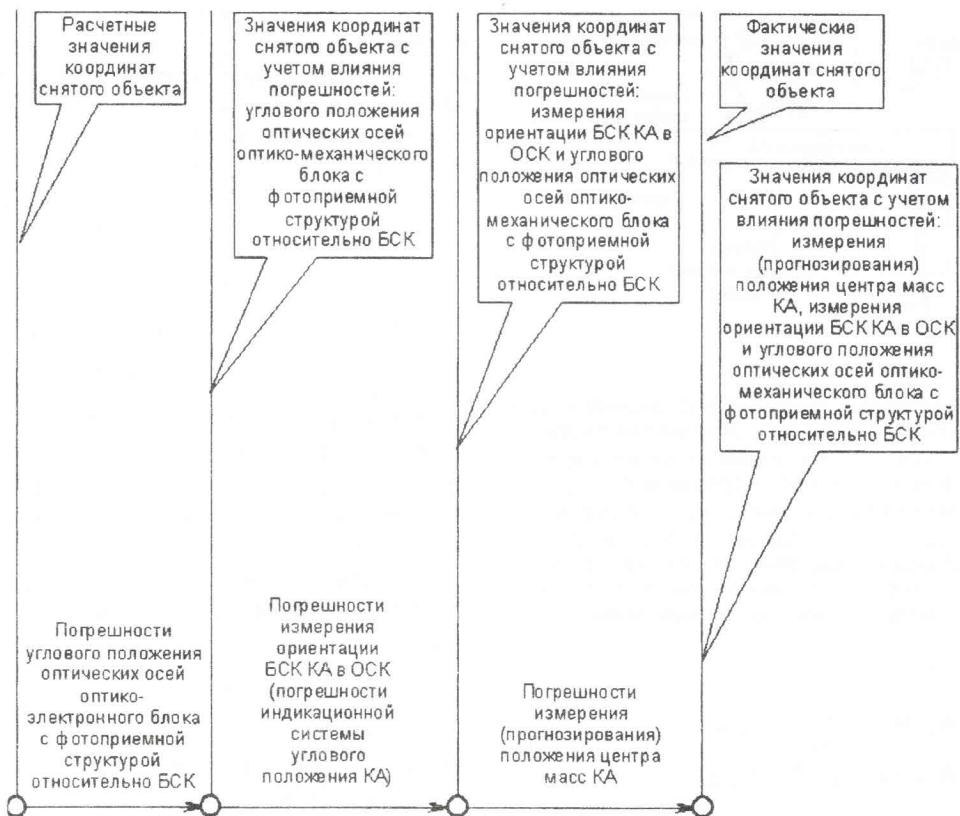


Рис. 2. Структурная схема влияния учитываемых погрешностей

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПОГРЕШНОСТЕЙ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ПО КОСМИЧЕСКИМ СНИМКАМ

Структурная схема влияния действия погрешностей на определение координат объекта. Суммарные предельные погрешности определения координат снятого объекта определяются последовательным суммарным действием ряда возмущений.

Структурная схема влияния учитываемых погрешностей на достичимую точность определения координат снятого объекта приведена на рис. 2.

Схема, иллюстрирующая относительную угловую погрешность положения базовой системы координат КА и осей бортовых приборов, приведена на рис. 3.

Влияние погрешностей. Исходными для расчета являются координаты интересующего объекта на снимке (в картинной плоскости), углы ориентации, параметры орбиты КА, аргумент широты КА и следующие виды погрешностей:

— угловые ($\Delta\theta$, $\Delta\varphi$, $\Delta\psi$). Это погрешности измерения ориентации БСК космического аппарата в ОСК и погрешности углового положения оптических осей оптико-электронного блока с фотоприем-

ной структурой относительно БСК;

— линейные (ΔX , ΔY , ΔZ) — погрешность измерения (или прогнозирования) положения центра масс КА в каждом направлении полета КА.

Результатами расчета являются погрешности определения координат снятого объекта.

Расчет погрешностей определения координат снятого объекта производится на базе расчета географических координат снятого объекта. Расчет координат снятого объекта производится путем последовательных переходов, приведенных на рис. 4.

Матрица перехода от ОСК к ССК осуществляется по формуле

$$A = A_\psi \cdot A_\varphi \cdot A_\theta, \quad (1)$$

где A_ψ , A_φ , A_θ — матрицы поворота на углы тангажа θ , крена φ , рыскания ψ .

Матрицы перехода от ОСК к ССК с учетом влияния угловой погрешности по тангажу $\Delta\theta$, крену $\Delta\varphi$ рысканию $\Delta\psi$, записываются соответственно в виде

$$A_{\text{угл}} = A_\psi \cdot A_\varphi \cdot A_{\theta+\Delta\theta},$$

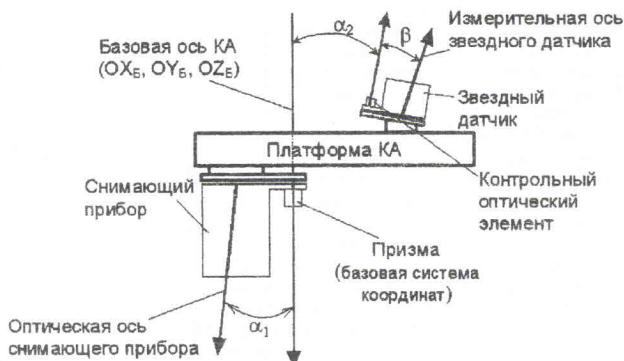


Рис. 3. Относительная угловая погрешность положения БСК и осей бортовых приборов. α_i — условные обозначения погрешностей привязки бортовой аппаратуры в каналах тангенса, крена и рыскания: α_1 — оптических осей БО с фотоприемной структурой МСУ к базовой системе координат, α_2 — контрольного оптического элемента звездного датчика к базовой системе координат, β — условное обозначение погрешности измерения звездным датчиком углового положения его контрольного оптического элемента в каналах тангенса, крена и рыскания

$$A_{\text{угл}} = A_\psi \cdot A_{\varphi + \Delta\varphi} \cdot A_{\theta + \Delta\theta},$$

$$A_{\text{угл}} = A_{\psi + \Delta\psi} \cdot A_\varphi \cdot A_{\theta + \Delta\theta},$$

где $A_{\theta + \Delta\theta}$, $A_{\varphi + \Delta\varphi}$, $A_{\psi + \Delta\psi}$ — матрицы поворота на углы $\theta + \Delta\theta$, $\varphi + \Delta\varphi$, $\psi + \Delta\psi$.

Координаты объекта в фотограмметрической системе координат (ФСК) (начало координат совпадает с центром Земли, направление осей совпадает с направлением соответствующих осей ОСК) с учетом влияния угловой погрешности определяются по формуле

$$\begin{pmatrix} X_{\text{погр}} \\ Y_{\text{погр}} \\ Z_{\text{погр}} \end{pmatrix} = (A_{\text{угл}})^T \cdot k_{\text{погр}} \cdot \left[\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{pmatrix} \right] + \begin{pmatrix} X_s \\ Y_s \\ Z_s \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где $(A_{\text{угл}})^T$ — транспонированная матрица; $k_{\text{погр}}$ — коэффициент пропорциональности, определяемый из системы уравнений сферы и прямой, образуемой оптической осью; x, y, z — координаты объекта в картинной плоскости; x_s, y_s, z_s — координаты центра проецирования S в системе координат, связанной со снимком; X_s, Y_s, Z_s — координаты центра проецирования S в ФСК.

Координаты объекта в ФСК с учетом влияния линейной погрешности определяются по формулам

$$\begin{pmatrix} X_{\text{погр}} \\ Y_{\text{погр}} \\ Z_{\text{погр}} \end{pmatrix} = A_{\text{погр}} \cdot \left[A^T \cdot k \cdot \left[\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{pmatrix} \right] + \begin{pmatrix} X_s \\ Y_s \\ Z_s \end{pmatrix} \right], \quad (3)$$

где $A_{\text{погр}}$ — матрица перехода от координат объекта в смещенной ФСК (положение которой определяется в результате действия погрешности измерения центра масс в каждом направлении) к координатам



Рис. 4. Последовательность переходов при расчете координат снятого объекта на поверхности Земли: А — матрица перехода от ОСК к ССК (поворот на углы θ, φ, ψ); В — матрица перехода от ГСК к ФСК (поворот на углы Ω, i, ω); k — коэффициент пропорциональности; x_s, y_s, z_s — координаты центра проецирования S в СКФС; X_s, Y_s, Z_s — координаты центра проецирования S в ФСК

объекта в ФСК при номинальном положении КА — по касательной к орбите, по бинормали к орбите, по высоте орбиты соответственно:

$$\mathbf{A}_{\text{норп}} = \begin{pmatrix} \cos\alpha_x & 0 & \sin\alpha_x \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\alpha_x & 0 & \cos\alpha_x \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{A}_{\text{норп}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha_y & \sin\alpha_y \\ 0 & -\sin\alpha_y & \cos\alpha_y \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{A}_{\text{норп}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

где отклонения ФСК из-за влияния погрешности по касательной к орбите и по бинормали к орбите составляют соответственно

$$\alpha_x = \frac{\Delta X}{R_3 + h},$$

$$\alpha_y = \frac{\Delta Y}{R_3 + h}.$$

Здесь R_3 — радиус Земли; h — высота орбиты КА.

Для определения коэффициента пропорциональности $k_{\text{норп}}$, входящего в выражение (2), воспользуемся уравнением земной сферы в фотограмметрической системе координат:

$$X_{\text{норп}}^2 + Y_{\text{норп}}^2 + Z_{\text{норп}}^2 = (R_3 + h_1)^2, \quad (4)$$

где h_1 — среднее превышение района съемки над уровенной поверхностью.

Подставляя в уравнение (4) координаты объекта в фотограмметрической системе координат $(X_{\text{норп}}, Y_{\text{норп}}, Z_{\text{норп}})$, выражаемые соотношением (2), и учитывая значения координат центра проектирования S , получим квадратное уравнение относительно коэффициента пропорциональности $k_{\text{норп}}$:

$$(k_{\text{норп}})^2(a_{11}x + a_{21}y + a_{31}f)^2 +$$

$$+ (k_{\text{норп}})^2(a_{12}x + a_{22}y + a_{32}f)^2 +$$

$$+ (k_{\text{норп}})(a_{13}x + a_{23}y + a_{33}f) + r)^2 = (R_3 + h_1)^2 \quad (5)$$

где r — радиус-вектор КА: $r = R_3 + h$;

Введем следующие обозначения:

$$D_1 = a_{11}x + a_{21}y + a_{31}f,$$

$$D_2 = a_{12}x + a_{22}y + a_{32}f,$$

$$D_3 = a_{13}x + a_{23}y + a_{33}f.$$

После преобразования, используя введенные обозначения, уравнение (5) будет иметь вид

$$k_{\text{норп}}^2[(D_1)^2 + (D_2)^2 + (D_3)^2] + 2rk_{\text{норп}}D_3 +$$

$$+ r^2 \left[1 - \left(\frac{R_3 + h_1}{r} \right)^2 \right] = (R_3 + h_1)^2. \quad (6)$$

Разрешим уравнение (6) относительно коэффициента пропорциональности $k_{\text{норп}}$.

Решение, соответствующее наблюдаемой стороне земной поверхности, имеет форму

$$k_{\text{норп}} = \frac{r}{D_1^2 + D_2^2 + D_3^2} \times$$

$$\times \{-D_3 + [D_3^2 - (D_1^2 + D_2^2 + D_3^2)] [1 - [(R_3 + h_1)/r]^2]^{1/2}\}.$$

Второе решение, соответствующее антиподной точке земной поверхности, не рассматривается. Коэффициент пропорциональности k определяется аналогично, по выражению (3).

Координаты снятого объекта в гринвичской системе координат с учетом влияния погрешностей равны

$$\begin{pmatrix} X_{\Gamma\text{норп}} \\ Y_{\Gamma\text{норп}} \\ Z_{\Gamma\text{норп}} \end{pmatrix} = \mathbf{B}^T \cdot \begin{pmatrix} X_{\text{норп}} \\ Y_{\text{норп}} \\ Z_{\text{норп}} \end{pmatrix},$$

где \mathbf{B} — матрица поворота от ГСК к ФСК на углы Ω, i, ω : Ω — долгота восходящего узла текущего витка КА в ГСК в момент съемки; i — наклонение орбиты КА; ω — аргумент широты КА.

Географические координаты снятого объекта с учетом влияния погрешностей рассчитываются в соответствии с геометрическими соотношениями

1) долгота

$$\lambda_{\text{норп}} = \arctg(Y_{\Gamma\text{норп}}/X_{\Gamma\text{норп}});$$

2) широта

$$\delta_{\text{норп}} = \arctg(Z_{\Gamma\text{норп}}/\sqrt{X_{\Gamma\text{норп}}^2 + Y_{\Gamma\text{норп}}^2}).$$

Суммарная предельная погрешность географических координат может быть рассчитана как геометрическая сумма влияния всех составляющих.

Погрешность определения долготы и широты снятого объекта (из-за влияния всех учитываемых составляющих погрешности) равна

$$\Delta\lambda_{\text{норп}} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\lambda - \lambda_{\text{норп}i})^2},$$

$$\Delta\delta_{\text{норп}} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\delta - \delta_{\text{норп}i})^2},$$

где n — количество учитываемых погрешностей: $n = n_t + n_k + n_r + n_{lin}$, n_t — количество погрешностей по тангажу; n_k — количество погрешностей по

крену; n_r — количество погрешностей по рысканию; n_{lin} — количество направлений, вдоль которых производится измерение положения центра масс КА на орбите (по касательной, бинормали, нормали); λ — номинальное значение долготы снятого объекта, δ — номинальное значение широты снятого объекта.

Погрешность определения положения объекта в направлении касательной и бинормали к трассе КА из-за влияния любой из учитываемых погрешностей равна

$$P_X = R_3 [\arcsin(X_{\text{поп}}/R_3) - \arcsin(X/R_3)],$$

$$P_Y = R_3 [\arcsin(Y_{\text{поп}}/R_3) - \arcsin(Y/R_3)],$$

где $X_{\text{поп}}$, $Y_{\text{поп}}$ — соответственно координаты объекта в направлении касательной и бинормали к трассе в ФСК с учетом влияния любой учитываемой (угловой, линейной) погрешности, вычисляемые по формулам (2) и (3); X , Y — номинальные значения координат объекта в направлении касательной и бинормали к трассе в ФСК.

Расчет суммарной предельной погрешности определения положения объекта в направлениях касательной и бинормали к трассе КА. Суммарные предельные погрешности определения положения объекта в направлении касательной и бинормали к трассе КА (из-за влияния всех учитываемых составляющих погрешности) вычисляются по формулам:

$$\Delta X_{\Sigma} = \sqrt{\sum_{i=1}^n P_{X_i}^2},$$

$$\Delta Y_{\Sigma} = \sqrt{\sum_{i=1}^n P_{Y_i}^2}.$$

Суммарная предельная круговая погрешность определения положения объекта на поверхности Земли

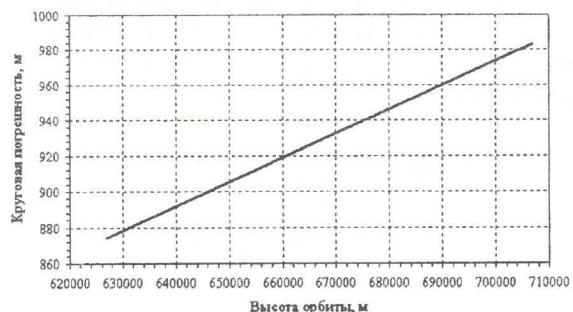


Рис. 5. Зависимость предельной круговой погрешности определения координат объекта от высоты орбиты КА

ли вычисляется по формуле

$$\Delta l_{\Sigma} = \sqrt{\Delta X_{\Sigma}^2 + \Delta Y_{\Sigma}^2}.$$

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТЕЙ

В качестве примера использования разработанной методики приведены результаты расчета зависимости суммарной предельной круговой погрешности определения координат объектов от значений проектных параметров космической системы «Січ-2».

Исходные данные для расчетов соответствуют проектным параметрам и их разбросам, приведенным в аванпроекте космической системы «Січ-2».

На рис. 5—7 приведены зависимости суммарной предельной круговой погрешности определения координат объекта от высоты орбиты КА, от углов ориентации оптических осей оптико-электронной системы (отклонения оптической оси от направления в надир) и от положения объекта на снимке при номинальных значениях остальных исходных данных.

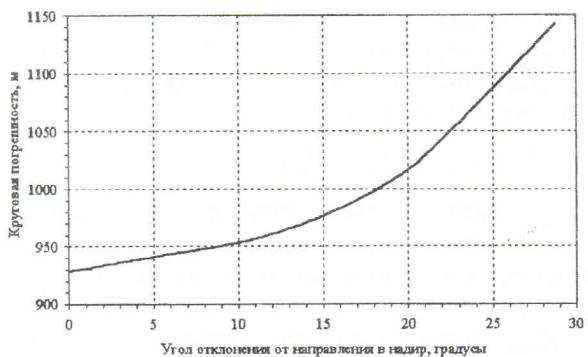


Рис. 6. Зависимость предельной круговой погрешности определения координат объекта от угла отклонения оптической оси

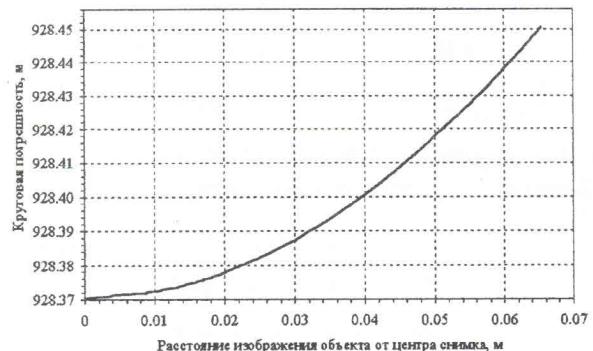


Рис. 7. Зависимость предельной круговой погрешности определения координат объекта от положения объекта на снимке

ВЫВОДЫ

Разработана инженерная методика расчета точности определения координат объектов по космическим снимкам поверхности Земли, не содержащим реперных точек. Методика предназначена для оценки точностных показателей целевой эффективности космической системы наблюдения Земли. Методика использована при проектировании космической системы «Січ-2». Рассчитана зависимость предельной погрешности координат от значений проектных параметров космической системы.

1. Баграков А. С. Общая модель для расчета и анализа скорости сдвига оптического изображения при съемке земной поверхности. // Исследование Земли из космоса.—1989.—4.— С. 99—106.
2. Ханцеверов Ф. Р., Острухов В. В. Моделирование космических систем изучения природных ресурсов Земли. — М.: Машиностроение, 1987.—264 с.

PROCEDURE FOR DETERMINING THE ACCURACY OF SATELLITE IMAGE-BASED POSITIONING

R. Dymarchuk, G. Borshchova, Ye. Yarmol'chuk

A procedure for determining the available accuracy of satellite image-based positioning is proposed. The procedure is intended to evaluate the accuracy-related performance of Earth observation system. The procedure allows us to determine errors in positioning based on satellite images without any reference points. Effects of the following errors in measurement of exterior orientation items are considered: 1) errors in the measurement or prediction of the spacecraft COG position, 2) spacecraft design errors, 3) errors in the measurement of spacecraft orientation angles. The following types of errors are analysed: 1) errors in the determination of object geographical coordinates (in angular measure), 2) errors in the determination of object coordinates along tangent and binormal to orbit (in linear measure). As an example of applying the procedure, results of analysing the dependence of limiting aggregate errors in positioning on the following design parameters of Sich 2 space system are presented: 1) orbital height, 2) nominal orientation of optical axes of the optoelectronic system, 3) object positions in satellite image.

УДК 537.52

РАБОЧИЕ ТЕЛА ДВУХСТУПЕНЧАТОГО КАТОДА-КОМПЕНСАТОРА ЭРД

© А. В. Хитко, Ф. А. Чміленко

Дніпропетровський національний університет

За робочі тіла двоступеневого катода-компенсатора ЕРД пропонується використовувати солі лужних металів, хімічно пасивні до повітря, наприклад карбонати. Температура розкладу карбонатів не перевищує емісійну температуру катода, що забезпечує стабільні втрати лужних металів.

Полые катоды, работающие на щелочных металлах, нашли широкое применение как в космической технике, так и в различных физических исследованиях [3]. В последние годы на базе стендового цезиевого катода [5] был разработан ампульный вариант катода, в котором весь запас рабочего тела помещен в полость двухступенчатого катода, а подача рабочего тела осуществляется за счет тепла, поступающего от внутреннего разряда (рис. 1). Эта конструктивная схема имеет лучшие энергетические характеристики и позволяет расширить диапазон рабочих токов в сторону их уменьшения. Ампульный катод использовался в качестве компенсатора системы инъекции пучка положительных ионов в эксперименте «Дион» международной программы «Фобос». В связи с этим первостепенными становятся вопросы длительного хранения изделия и стабильности его выходных параметров.

Наиболее уязвимым с точки зрения хранения

является рабочее тело. Традиционное использование чистого щелочного металла [2] затруднено, так как он активно взаимодействует с кислородом и влагой воздуха и требует проведения ряда мероприятий по герметизации, надежность которых необходимо подтвердить натурными экспериментами. Кроме того, щелочной металл необходимо связать с капиллярно-пористой структурой, позволяющей обеспечить работу в невесомости. При этом вопрос об удержании металла в структуре при воздействии инерционных нагрузок остается открытым. Резкая зависимость давления насыщенных паров от температуры в зоне испарения для чистого металла требует организации специальной управляющей системы, обеспечивающей стабильность выходных параметров. Все перечисленные трудности заставили отказаться от использования в качестве рабочего тела ампульного катода-компенсатора чистого щелочного металла.