УДК 629.783

ВЛИЯНИЕ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УГЛОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ВНЕШНЕГО ОРИЕНТИРОВАНИЯ НА ТОЧНОСТЬ ОЦЕНКИ КООРДИНАТ ОБЪЕКТОВ НА КОСМИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ

Бузуев К.В., *начальник сектора АО «РКЦ «Прогресс»;*
Мятов Г.Н., *д.т.н., заместитель главного конструктора АО «РКЦ «Прогресс», e-mail: miatov@mail.ru;*
Платошин И.В., *ведущий инженер АО «РКЦ «Прогресс».*

THE INFLUENCE OF ANGULAR EXTERNAL ORIENTATION ELEMENTS PRECISION ON GEODETIC REFERENCE OF IMAGES ACCURACY

Buzuev K.V., Miatov G.N., Platoshin I.V.

The problem of estimating the influence of angular external elements on geolocation of satellite images is discussed. The problem solution via search algorithm and mathematical simulation is presented.

Key words: satellite, remote sensing images, geodetic reference of images, angular external orientation elements.

Рассматривается задача оценки влияния точности определения угловых элементов внешнего ориентирования на точность оценки координат объекта, находящегося на пересечении центральной линии визирования с общеземным эллипсоидом. Рассматривается решение задачи с помощью поискового алгоритма. Определены условия математического моделирования. В соответствии с предложенным алгоритмом проведена оценка влияния точности определения угловых элементов внешнего ориентирования на точность определения координат объекта для определенных условий.

Ключевые слова: космический аппарат, дистанционное зондирование Земли, точность оценки координат объекта, точность определения угловых элементов внешнего ориентирования, алгоритм, обратная геодезическая задача.

Введение

В настоящее время космические аппараты (КА), предназначенные для дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне, например, такие как КА «Ресурс-П», применяются для решения следующих научно-технических задач [1]:

– составление и обновление общегеографических, тематических и топографических карт;

– контроль загрязнения и деградации окружающей среды, в том числе, экологический контроль в районах геологоразведочных работ и добычи полезных ископаемых, выявление и изучение загрязнений окружающей среды, контроль водоохранных и заповедных районов;

– наблюдение районов чрезвычайных ситуаций с целью упреждения развития стихийных бедствий, аварий, катастроф, а также оценка их последствий с целью планирования восстановительных мероприятий;

– контроль застройки территорий, получение данных для инженерной оценки местности в интересах хозяйственной деятельности и многих других.

Каждая из этих задач накладывает определенные требования к основным тактико-техническим характеристикам КА ДЗЗ: линейному разрешению на местности, производительности КА, оперативности доставки информации потребителю и точности определения координат объектов на снимке.

Для решения задач создания и обновления топографических карт к КА «Ресурс-П» впервые были предъявлены требования к обеспечению привязки снимков с точностью СКО 10-15 м.

Один из параметров, который оказывает существенное влияние на точность определения координат объекта (ТОКО) на снимке является точность оценки угловых элементов внешнего ориентирования (УЭВО) КА [2].

Постановка задачи

В статье решается задача оценки влияния точности определения УЭВО на ТОКО, находящегося на пересечении центральной линии визирования с общеземным эллипсоидом.

Для ее решения предлагается следующий алгоритм:

1) Из определенного диапазона околокруговых солнечно-синхронных орбит, как основного класса орбит для КА оптико-электронного наблюдения (ОЭН), выбирается орбита с заданной средней высотой.

2) Для выбранной орбиты проводится интегрирование уравнений движения центра масс КА на интервале одного витка его полета с фиксированным шагом интегрирования.

3) На каждом шаге интегрирования (соответствующем моменту времени $t_i \in [0; \mathrm{T_{OCK}}]$, где $\mathrm{T_{OCK}}$ – оскулирующий период обращения КА по орбите) выполняется построение векторов дальности ($\vec{D}_j$) до поверхности общеземного эллипсоида (ОЗЭ) по поверхности конуса наведения (рис. 1), определяемого углом отклонения линии визирования от надира (ξ) и углом отклонения линии визирования от курса (ζ). Здесь ξ – угол между радиус-вектором центра масс КА, взятым с обратным знаком, и вектором дальности до наблюдаемой точки, ζ – угол между проекцией вектора дальности на плос-

кость OX_OZ_O и направлением оси OX_O орбитальной системы координат (ОСК). За положительное направление ζ принимается вращение по часовой стрелке, если смотреть с положительного направления оси OY_O. Для каждого вектора $\vec{D}_j$ находятся координаты точки M^i_{j0} пересечения вектора дальности и поверхности ОЗЭ – $(\varphi^i_{j0};\lambda^i_{j0})$.

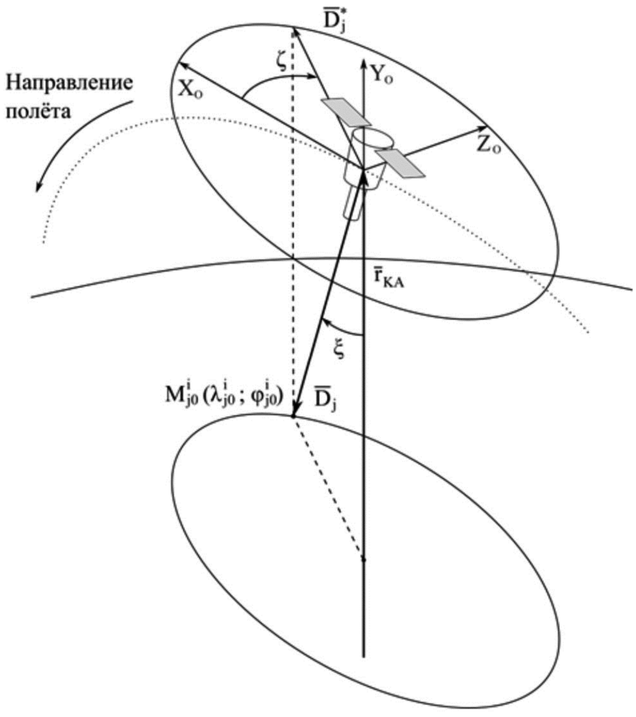

Рис. 1. Конус наведения КА

Для каждого вектора дальности строится набор векторов вспомогательных линий ($\vec{A}_k$) по поверхности конуса рассеяния (рис. 2), определяемого углом отклонения вспомогательной линии от линии визирования ($\Delta\xi$) и углом отклонения вспомогательной линии от курса ($\Delta\zeta$). Здесь $\Delta\xi$ – угол между вектором дальности и вектором вспомогательной линии, $\Delta\zeta$ – угол между проекцией вектора вспомогательной линии на плоскость, перпендикулярную вектору дальности и направлением оси OX_D вспомогательной системы координат (ВспСК). Центр ВспСК находится в центре масс КА, ось OY_D противоположно направлена вектору дальности, ось OX_D лежит в плоскости, образованной осями OY_D и OY_O, перпендикулярна оси OY_D и направлена в сторону оси OY_O (для случая $\xi = 0$ принимается, что ось OX_D совпадает с осью OX_O), ось OZ_D дополняет систему до правой ортогональной. Для каждого вектора $\vec{A}_k$ находятся координаты точки M^i_{jk} пересечения вспомогательной линии и поверхности ОЗЭ – $(\varphi^i_{jk};\lambda^i_{jk})$.

5. Находится расстояние L^i_{jk} между точками M^i_{jk} и M^i_{j0}.

6. Находится точность определения координат объекта для вектора дальности $\vec{D}_j$ на момент времени t_i: $L^i_j = \max\{L^i_{jk}\}$.

7. Находится точность определения координат объекта на момент времени t_i: $L^i = \max\{L^i_j\}$.

8. Находится точность определения координат объекта для текущей рабочей орбиты: $L_{H=X} = \max\{L^i\}$.

Для реализации предложенного алгоритма построена математическая модель.

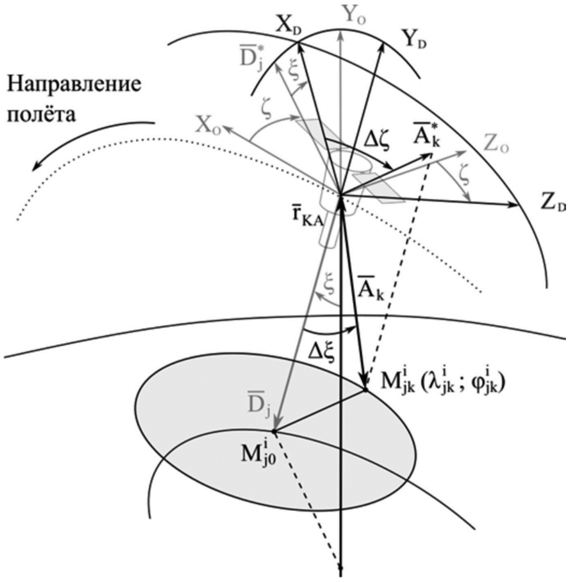

Рис. 2. Конус рассеяния

Построение вектора дальности и вспомогательной линии

Единичный вектор дальности может быть записан в проекции на оси ОСК в следующем виде:

$$\vec{l}^{\,OCK}_D = \frac{\vec{D}}{|\vec{D}|} = (\cos\zeta\cdot\sin\xi \quad -\cos\xi \quad \sin\zeta\cdot\sin\xi)^T. \tag{1}$$

Единичный вектор вспомогательной линии может быть записан в проекции на оси ВспСК в виде:

$$\vec{l}^{\,BcnCK}_A = \frac{\vec{A}}{|\vec{A}|} = = (\cos\Delta\zeta\cdot\sin\Delta\xi \quad -\cos\Delta\xi \quad \sin\Delta\zeta\cdot\sin\Delta\xi)^T. \tag{2}$$

Матрица перехода от ОСК к ИСК записывается в виде $M_{OH} = (\vec{X}_O\,|\,\vec{Y}_O\,|\,\vec{Z}_O)$, где X_O, Y_O, Z_O – оси ОСК, вычисляемые по формулам [3]:

$$\vec{Y}_O = \frac{\vec{r}}{|\vec{r}|},\ \vec{Z}_O = -\frac{\vec{r}\times\vec{V}}{|\vec{r}\times\vec{V}|},\ \vec{X}_O = \vec{Y}_O\times\vec{Z}_O. \tag{3}$$

Матрица перехода от ВспСК к ОСК записывается в виде $M_{DO} = (\vec{X}_D\,|\,\vec{Y}_D\,|\,\vec{Z}_D)$, где X_D, Y_D, Z_D – оси ВспСК, вычисляемые по формулам:

$$\vec{Y}_D = -\frac{\vec{D}}{|\vec{D}|} = -\vec{l}^{\,OCK}_D,\ \vec{Z}_D = -\frac{\vec{Y}_D\times\vec{Y}^{OCK}_O}{|\vec{Y}_D\times\vec{Y}^{OCK}_O|},$$

$$\vec{X}_D = \frac{\vec{Y}_D\times\vec{Z}_D}{|\vec{Y}_D\times\vec{Z}_D|},\ \vec{Y}^{OCK}_O = (0 \quad 1 \quad 0)^T. \tag{4}$$

Проекции единичного вектора дальности на оси ИСК вычисляются как

$$\vec{l}_D^{ИСК} = M_{ОИ} \cdot \vec{l}_D^{ОСК}. \quad (5)$$

Проекции единичного вектора вспомогательной линии на оси ИСК вычисляются по формуле:

$$\vec{l}_A^{ИСК} = M_{ОИ} \cdot M_{DO} \cdot \vec{l}_A^{ВспСК}. \quad (6)$$

Нахождение координат точки пересечения линии визирования с ОЗЭ

Для нахождения радиус-вектора ($\vec{R}_З$), исходящего из центра ОЗЭ в точку пересечения линии визирования с ОЗЭ, представим его как сумму радиус-вектора центра масс КА ($\vec{r}_{КА}$) и вектора дальности $\vec{D}$:

$$\vec{R}_З = \vec{r}_{КА} + \vec{D} \quad (7)$$

и подставим в уравнение ОЗЭ:

$$R_{ЗX}^2 + R_{ЗY}^2 + \frac{R_{ЗZ}^2}{(1-\alpha_{СЖ})^2} = R_Э^2, \quad (8)$$

где $R_{ЗX}$, $R_{ЗY}$, $R_{ЗZ}$ – проекции радиус-вектора $\vec{R}_З$ на оси ИСК, $R_Э$ = 6378,136 км – экваториальный радиус, $\alpha_{СЖ} = \dfrac{1}{298,25784}$ – коэффициент полярного сжатия ОЗЭ [4]. В результате получим уравнение:

$$(r_X + D_X)^2 + (r_Y + D_Y)^2 + \frac{(r_Z + D_Z)^2}{(1-\alpha_{СЖ})^2} = R_Э^2, \quad (9)$$

где $r_X, r_Y, r_Z, D_X, D_Y, D_Z$ – проекции векторов $\vec{r}_{КА}$ и $\vec{D}$ на оси ИСК.

Раскроем скобки и проведем группировку слагаемых относительно модуля вектора дальности (D), учитывая, что $D_X = D \cdot l_{DX}^{ИСК}, D_Y = D \cdot l_{DY}^{ИСК}, D_Z = D \cdot l_{DZ}^{ИСК}$. Получим уравнение:

$$\left(l_{DX}^2 + l_{DY}^2 + \frac{l_{DZ}^2}{(1-\alpha_{СЖ})^2} \right) \cdot D^2 + \\ +2 \cdot \left(r_X \cdot l_{DX}^{ИСК} + r_Y \cdot l_{DY}^{ИСК} + \frac{r_Z \cdot l_{DZ}^{ИСК}}{(1-\alpha_{СЖ})^2} \right) \cdot D + \\ + \left(r_X^2 + r_Y^2 + \frac{r_Z^2}{(1-\alpha_{СЖ})^2} \right) - R_Э^2 = 0, \quad (10)$$

где

$l_{DX}^2 = l_{DX}^{ИСК} \cdot l_{DX}^{ИСК}$, $l_{DY}^2 = l_{DY}^{ИСК} \cdot l_{DY}^{ИСК}$, $l_{DZ}^2 = l_{DZ}^{ИСК} \cdot l_{DZ}^{ИСК}$, $l_{DX}^{ИСК}$, $l_{DY}^{ИСК}$, $l_{DY}^{ИСК}$, $l_{DZ}^{ИСК}$ – проекции вектора $\vec{l}_D^{ИСК}$ на оси ИСК.

Введем следующие обозначения:

$\vec{r}_П = \left(r_X \quad r_Y \quad \dfrac{r_Z}{(1-\alpha_{СЖ})} \right)^T$ – приведенный радиус-вектор КА;

$\vec{l}_П = \left(l_{DX}^{ИСК} \quad l_{DY}^{ИСК} \quad \dfrac{l_{DZ}^{ИСК}}{(1-\alpha_{СЖ})} \right)^T$ – приведенный единичный вектор дальности;

$C_{rl} = \vec{r}_П \cdot \vec{l}_П$ – скалярное произведение векторов $\vec{r}_П$ и $\vec{l}_П$.

Тогда уравнение (10) запишется в виде:

$$l_П^2 \cdot D^2 + 2 \cdot C_{rl} \cdot D + (r_П^2 - R_Э^2) = 0. \quad (11)$$

Корни этого квадратного уравнения находятся в виде:

$$D_{1,2} = \frac{-C_{rl} \pm \sqrt{C_{rl}^2 + l_П^2 \cdot (R_Э^2 - r_П^2)}}{l_П^2}. \quad (12)$$

Введем обозначения: $d = C_{rl}^2 + l_П^2 \cdot (R_Э^2 - r_П^2)$, $a = \dfrac{-C_{rl}}{l_П^2}$, $b = \dfrac{\sqrt{d}}{l_П^2}$. Отметим, что $a > 0$ и $b > 0$. Для случая $d > 0$ (пересечение линией визирования поверхности ОЗЭ) формула (12) запишется как $D_1 = a - b$, $D_2 = a + b$, а искомым корнем будет D_1.

Тогда геоцентрические координаты точки пересечения линии визирования с поверхностью ОЗЭ находятся по формуле:

$$\begin{cases} \varphi = \arcsin \dfrac{R_{ЗZ}}{R_З} \\ \lambda = \arcsin \dfrac{R_{ЗX}}{R_З \cdot \cos\varphi}, sign(\cos\lambda) = sign(R_{ЗX}), \end{cases} \quad (13)$$

где $R_{Зi} = r_i + D_1 \cdot l_{Di}^{ИСК}$, $i = X, Y, Z$, а $R_З = \sqrt{R_{ЗX}^2 + R_{ЗY}^2 + R_{ЗZ}^2}$.

Геоцентрические координаты точки пересечения вспомогательной линии с поверхностью ОЗЭ находятся аналогично, путем замены в формулах (10)-(13) вектора $\vec{l}_D^{ИСК}$ на вектор $\vec{l}_A^{ИСК}$, вычисленный по формуле (6).

Перевод геоцентрической широты в геодезическую (долготы в геоцентрической и геодезической системах координат совпадают) осуществляется по формуле:

$$tgB = \frac{tg\varphi}{(1-\alpha_{СЖ})^2}. \quad (14)$$

Нахождение расстояния между точками пересечения $\vec{D}_j$ и $\vec{A}_k$ с поверхностью ОЗЭ

Нахождение расстояния между точками пересечения линии визирования и вспомогательной линии с поверхностью ОЗЭ является частью решения обратной геодезической задачи на малые расстояния по формулам со средними аргументами и проводится в соответствии с [5] по формулам:

$$b = \frac{B_2 - B_1}{\rho''}; \; l = \frac{L_2 - L_1}{\rho''}, \quad (15)$$

где b – разность геодезических широт, выраженная в радианах, l – разность долгот, выраженная в радианах, $\rho'' = \dfrac{180}{\pi} \cdot 3600$ – коэффициент перевода угловых секунд в радианы;

$$B_m = \frac{B_1 + B_2}{2}; \; \eta_m^2 = e'^2 \cdot \cos^2 B_m, \quad (16)$$

где B_m – средняя широта, η_m – вспомогательная функция эксцентриситета для средней точки, $e' = \dfrac{\sqrt{R_Э^2 - R_П^2}}{R_П}$ – второй эксцентриситет, $R_П = 6356{,}75136$ км – полярный радиус ОЗЭ;

$$Q = b \cdot M_m \cdot \left(1 - (e'^2 - 2 \cdot \eta_m^2) \frac{R_{\text{П}}^2}{8} - \right. \\ \left. -(1+\eta_m^2) \cdot \frac{(l \cdot \cos B_m)^2}{12} - \frac{(l \cdot \sin B_m)^2}{8} \right), \quad (17)$$

$$P = l \cdot \cos B_m \cdot N_m \times \\ \times \left(1 + (1 - 9 \cdot e'^2 + 8 \cdot \eta_m^2) \frac{b^2}{24} - \frac{(l \cdot \sin B_m)^2}{24} \right), \quad (18)$$

где M_m и N_m – главные радиусы кривизны. Эти параметры вычисляются в средней точке по формулам:

$$M_m = \frac{R_{\text{Э}} \cdot (1 - e^2)}{\sqrt{(1 - e^2 \cdot \sin^2 B_m)^3}}, \quad N_m = \frac{R_{\text{Э}}}{\sqrt{1 - e^2 \cdot \sin^2 B_m}},$$

$$e = \frac{\sqrt{R_{\text{Э}}^2 - R_{\text{П}}^2}}{R_{\text{Э}}}. \quad (19)$$

Искомое кратчайшее расстояние (s – длина геодезической линии) между точками находится как

$$s = \sqrt{Q^2 + P^2}. \quad (20)$$

Исходные данные и результаты моделирования

В качестве исходных данных для проведения оценки были выбраны:

– около круговые солнечно-синхронные орбиты со средней высотой от 300 до 800км с шагом 50 км;

– количество расчетных точек для каждой орбиты: 100 точек;

– распределение точек по орбите: равномерное;

углы отклонения линии визирования от надира (ξ) от 0 до 30° с шагом 5°;

– углы отклонения линии визирования от курса (ζ) от 0 до 360° с шагом 1°;

– половины углов при вершине конуса рассеяния ($\Delta\xi$): 1´´, 2´´, 3´´, 4´´, 5´´, 10´´, 20´´, 30´´, 40´´, 50´´, 1´;

– углы отклонения вспомогательной линии от курса ($\Delta\zeta$) от 0 до 360° с шагом 1°.

Некоторые результаты оценки влияния точности определения УЭВО на ТОКО приведены на рис. 3-5.

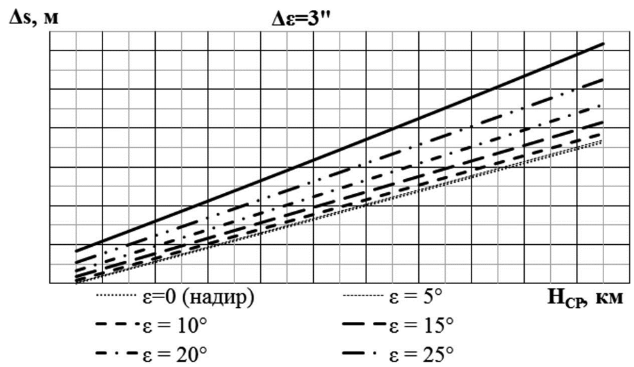

Рис. 3. Зависимость ТОКО от угла отклонения ЦЛВ от надира и средней высоты рабочей орбиты для точности определения УЭВО в 3”

На рис. 3 показано, что зависимость ТОКО для высоких точностей определения УЭВО носит линейный характер, угол наклона прямой к оси абсцисс определяется ε – углом отклонения ЦЛВ от надира. При малых углах отклонения от надира (от 0 до 10°) разница в ТОКО измеряется в единицах сантиметров вне зависимости от средней высоты рабочей орбиты. По мере возрастания ε (от 10 до 30°) разница в ТОКО достигает десятков сантиметров для орбит со средней высотой от 300 до 450 км, а для орбит со средней высотой 500 км и более – единиц метров.

Точность определения УЭВО в 3´´ была подтверждена для приборов БОКЗ-М, входящих в состав системы управления движением КА «Ресурс-П» как при наземной экспериментальной отработке [6], так и при его летной эксплуатации. Как видно из рис. 3, для такой точности определения УЭВО и углах отклонения от надира не более 25° значение ТОКО не превышает величины 8 м и позволяет выполнить предъявленные к КА «Ресурс-П» требования в части точности привязки снимков.

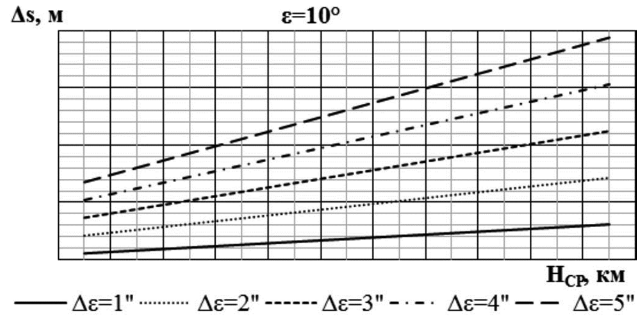

Рис. 4. Зависимость ТОКО от точности определения УЭВО и средней высоты рабочей орбиты для угла отклонения ЦЛВ от надира 10°

Как видно из рис. 4, зависимость ТОКО для малых углов отклонения ЦЛВ от надира также носит линейный характер, а угол наклона прямой к оси абсцисс определяется $\Delta\varepsilon$ – точностью оценки УЭВО. При высоких точностях определения УЭВО (на уровне единиц угловых секунд) разница в ТОКО пропорциональна величине $\Delta\varepsilon$ и при увеличении точности определения УЭВО на 1” изменяется в диапазоне от 1,5 м для рабочих орбит со средней высотой 300 км и до 4 м для рабочих орбит со средней высотой 800км. Сравнивая рис. 3 и 4, можно отметить, что $\Delta\varepsilon$ вносит больший вклад в значение ТОКО (Δs) по сравнению с угол ε.

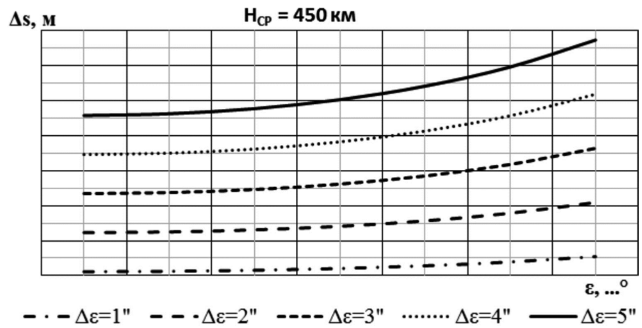

Рис. 5. Зависимость точности определения координат объекта от точности определения УЭВО и угла отклонения ЦЛВ от надира для рабочей орбиты со средней высотой 450 км

Приведенная на рис. 5 зависимость показывает наличие нелинейности в изменении ТОКО при увеличении угла ε. Причем, чем больше значение $\Delta\varepsilon$, тем раньше (при меньших ε) начинает проявляться нелинейность. Так, для значений Δs не более 5 метров, требуется точность определения УЭВО на уровне 1-2´´, причем при $\Delta\varepsilon$ = 2´´ угол ε должен находится в диапазоне от 0 до 17,5°.

Заключение

Таким образом, в работе предложен алгоритм оценки влияния точности оценки угловых элементов внешнего ориентирования КА на точность определения координат объекта, находящегося на пересечении центральной линии визирования с общеземным эллипсоидом. Представлена математическая модель предложенного алгоритма, проведена оценка влияния точности определения угловых элементов внешнего ориентирования КА на точность определения координат объекта. Результаты, приведенные в данной статье, подтверждаются данными летной эксплуатации КА «Ресурс-П» и могут быть использованы при проектировании перспективных КА оптико-электронного наблюдения.

Литература

1. Кирилин А.Н., Аншаков Г.П., Ахметов Р.Н., Сторож А.Д. Космическое аппаратостроение: научно-технические исследования и практические разработки ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс» / Под редакцией А.Н. Кирилина. – Самара: Издательский дом «АГНИ», – 2011. – 280 с.

2. Самойлов С.Ю. Модель определения географических координат объектов по космическим снимкам при помощи аналитического метода // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина, 2011. № 4. С. 58-65.

3. Основы теории полёта космических аппаратов / Под редакцией Г.С. Нариманова и М.К. Тихонравова. – М.: Машиностроение, 1976.– 608 с.

4. Параметры общего земного эллипсоида и гравитационного поля Земли (Параметры Земли 1990 года). – М: Ред.-изд. отдел ТС ВС РФ, – 2014. – 52 с.

5. Морозов В.П. Курс сфероидической геодезии – М.:Недра, 1979.–296 с.

6. Никитин А.В., Дунаев Б.С., Красиков В.А. Анализ функционирования трех приборов звездной ориентации БОКЗ-М при съемке звездного неба // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 4. С. 34-42.