

Электродинамика и антенные системы

DOI 10.24412/2221-2574-2023-3-61-67

УДК 528.088.21: 621.396.96

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КООРДИНАТ ТОЧКИ ПРИЦЕЛИВАНИЯ АНТЕННЫ РАДИОЛОКАТОРА С СИНТЕЗИРОВАНИЕМ АПЕРТУРЫ КОСМИЧЕСКОГО БАЗИРОВАНИЯ

Федоров Владимир Сергеевич

кандидат технических наук, начальник лаборатории АО «Корпорация «Фазотрон-НИИР».

E-mail: fedorov@phasotron.com

Адрес: 115516, Российская Федерация, г. Москва, Кавказский б-р, д. 59.

Аннотация: Дается определение точки прицеливания антенны космического аппарата, осуществляющего съёмку определённого участка земной поверхности. Приводится построение основных систем координат, расчёт точки прицеливания антенны с учётом аппроксимации формы земной поверхности эллипсоидом. Изучается влияние погрешностей углов установки антенны на точность определения координат точки прицеливания. Определяются допустимые значения погрешностей углов азимута и места, гарантирующие требуемую точность.

Ключевые слова: космический аппарат, диаграмма направленности антенны, фазовый центр, угол азимута, угол места, гринвичская система координат, система координат синтезирования, земной эллипсоид.

Введение

При проектировании режимов съёмки Земли радиолокатором с синтезированием апертуры антенны космического базирования и расчёте параметров траекторного сигнала необходимо учитывать ряд специфических факторов [1–4], отличающих такие комплексы от авиационных. В первую очередь особенности расчётов для радиолокационных космических комплексов связаны с кривизной земной поверхности, вращением Земли, ошибками в измерении координат и ориентации осей космического аппарата (КА). Баллистические расчёты движения КА, результаты траекторных измерений, параметры геоида служат основой для формирования управляющих воздействий, которые обеспечат нацеливание антенной системы радиолокатора на объект съёмки.

Точка прицеливания антенны КА определяется пересечением оси визирования, проходящей через фазовый центр антенны (ФЦА) с поверхностью эллипсоида, которой принадлежит наблюдаемый объект. Цель работы — изучить влияние погрешностей углов установ-

ки антенны на величину ошибок определения координат точки прицеливания и определить максимальные значения этих погрешностей при заданных ограничениях. Требуемое положение точки прицеливания антенны КА при съёмке участка земной поверхности определяется координатами наблюдаемого объекта. Задание на съёмку содержит геодезические широту φ и долготу λ объекта съёмки. С помощью таблицы высот по широте и долготе можно определить высоту h данной точки над поверхностью эллипсоида, используемого для аппроксимации земной поверхности. Таким образом, положение объекта съёмки определено тройкой чисел (φ, λ, h) . В соответствии с заданием на съёмку методами баллистики определяется момент времени t_0 , соответствующий минимальному расстоянию от космического аппарата (КА) на орбите до объекта съёмки. Для момента времени t_0 по данным навигационно-баллистического обеспечения (НБО) рассчитываются и выдаются в числе прочих следующие параметры:

- вектор

$$\mathbf{R} = \{X_{КА} \ Y_{КА} \ Z_{КА}\}^T$$

координат центра масс КА в гринвичской системе координат (ГСК);

- вектор

$$\mathbf{V} = \{V_x \ V_y \ V_z\}^T$$

путевой скорости КА в ГСК.

Положение точки прицеливания определяется углами азимута и места оси диаграммы направленности антенны (ДНА), которые удобно определять в системе координат синтезирования (СКС). В силу разных причин эти углы могут отличаться от заданных значений. Задача состоит в том, чтобы по имеющимся оценкам этих углов определить координаты точки прицеливания и получить

условия, которым должны удовлетворять погрешности углов азимута и места, чтобы была обеспечена необходимая точность определения координат точки прицеливания.

Системы координат

Положение объекта съёмки задаётся в геодезической эллипсоидальной системе координат (ГЭСК) [5]. В ГЭСК широта φ , соответствующая точке P на поверхности эллипсоида, определяется как угол наклона нормали в точке P к плоскости экватора (см. рис. 1). Другие используемые системы координат — ГСК и СКС. Ось $O_c Z_c$ СКС проводится через фазовый центр антенны (ФЦА), ось $O_c Y_c$ проходит через объект съёмки (рис. 2). Будем считать, что заданы координаты ФЦА в ГСК в момент времени t_0 .

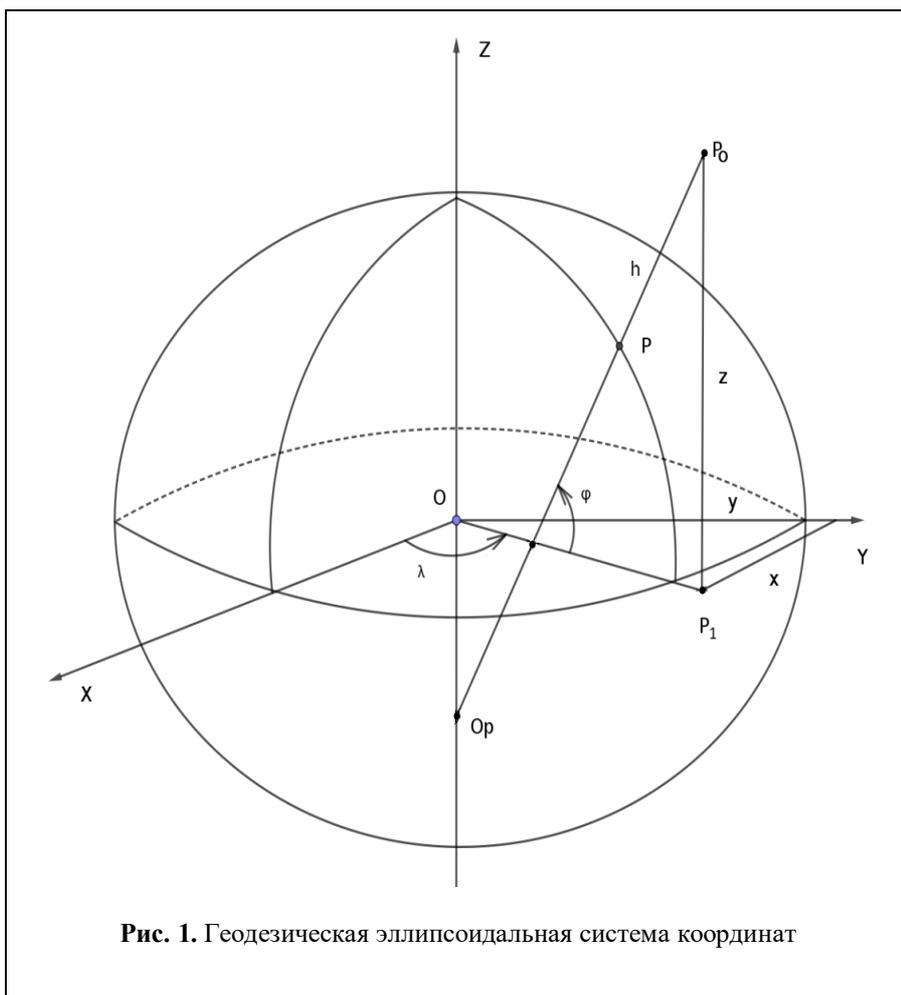


Рис. 1. Геодезическая эллипсоидальная система координат

Расчёт координат точки прицеливания

Вычисление координат в ГСК заданного объекта $P_0(X^{P_0}, Y^{P_0}, Z^{P_0})$ на высоте h над поверхностью земного эллипсоида

$$X^{P_0} = (N + h) \cos \varphi \cos \lambda,$$

$$Y^{P_0} = (N + h) \cos \varphi \sin \lambda,$$

$$Z^{P_0} = (N + h - Ne^2) \sin \varphi,$$

где $N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi}}$; $-\frac{\pi}{2} < \varphi < \frac{\pi}{2}$, $0 \leq \lambda < 2\pi$,

$a = 6378136$ м — большая полуось эллипсоида;
 $b = 6356751$ м — малая полуось эллипсоида;
 $e = 0,08181979739$ — первый эксцентриситет эллипсоида.

Эти параметры общеземного эллипсоида (ОЗЭ) соответствуют геоцентрической системе

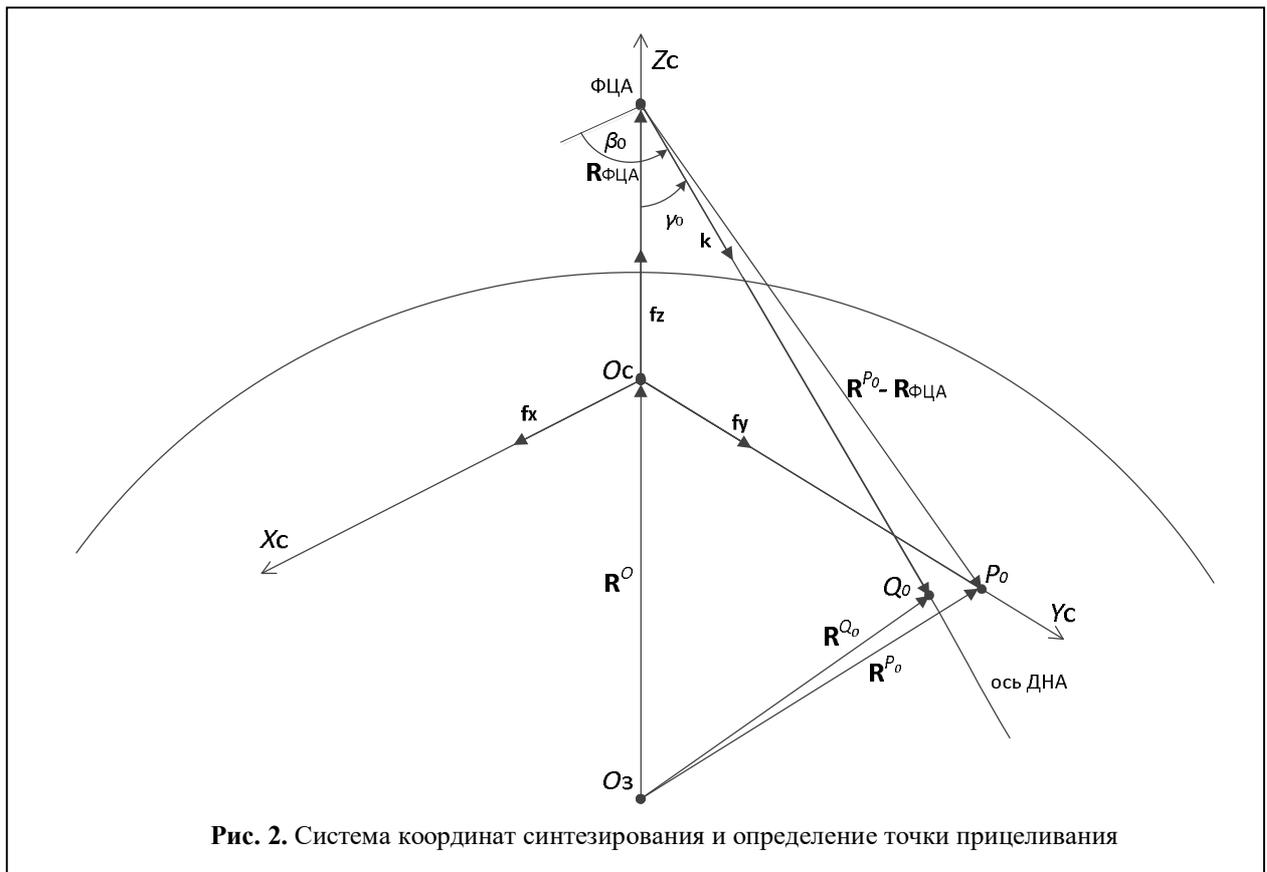


Рис. 2. Система координат синтезирования и определение точки прицеливания

координат «Параметры Земли 1990 года» (ПЗ-90), используемой в целях геодезического обеспечения орбитальных полётов и решения навигационных задач (см. [6]).

Построение СКС

Пусть $\mathbf{R}_{\PhiЦА} = \{X_{\PhiЦА} \ Y_{\PhiЦА} \ Z_{\PhiЦА}\}^T$ положение ФЦА в ГСК в момент времени t_0 . Найдём координаты начала СКС $O_c(X_c, Y_c, Z_c)$. Направляющий вектор оси $O_c Z_c$ СКС $\mathbf{f}_z = \mathbf{R}_{\PhiЦА} / |\mathbf{R}_{\PhiЦА}|$. Положение точки O_c задается вектором $\mathbf{R}^O = \mathbf{R}_{\PhiЦА} + \langle (\mathbf{R}^{P_0} - \mathbf{R}_{\PhiЦА}), \mathbf{f}_z \rangle \mathbf{f}_z$, где $\mathbf{R}^{P_0} = \{X^{P_0} \ Y^{P_0} \ Z^{P_0}\}^T$ (здесь для двух векторов \mathbf{x} и \mathbf{y} в трёхмерном евклидовом пространстве через $\langle \mathbf{x}, \mathbf{y} \rangle$ обозначено скалярное произведение, а $\mathbf{x} \times \mathbf{y}$ векторное произведение, $|\mathbf{x}|$ – модуль вектора \mathbf{x}). Направляющие векторы осей $O_c Y_c$ и $O_c X_c$ определим как

$\mathbf{f}_y = (\mathbf{R}^{P_0} - \mathbf{R}^O) / |\mathbf{R}^{P_0} - \mathbf{R}^O|$ и $\mathbf{f}_x = \mathbf{f}_y \times \mathbf{f}_z$ соответственно (см. рис. 2).

Вычисление координат в ГСК фактической точки прицеливания (соответствующей имеющимся оценкам углов визирования)

Предположим, получены оценки реализованных углов азимута β_0 и места γ_0 , определяющих положение оси диаграммы направленности антенны (ДНА). Требуется найти координаты в ГСК точки прицеливания, которая определяется как точка пересечения оси ДНА, соответствующей этим значениям углов, с поверхностью эллипсоида, задаваемого уравнением

$$\frac{X^2}{(a+h)^2} + \frac{Y^2}{(a+h)^2} + \frac{Z^2}{(b+h)^2} = 1,$$

которому принадлежит точка $P_0(X^{P_0}, Y^{P_0}, Z^{P_0})$.

Пусть $\mathbf{g}_x, \mathbf{g}_y, \mathbf{g}_z$ ортонормированный базис в ГСК. Тогда $\mathbf{W} = \|\langle \mathbf{g}_\lambda, \mathbf{f}_\mu \rangle\|_{\lambda, \mu = x, y, z}$ матрица пре-

образования координат от ГСК к СКС. Единичный направляющий вектор оси ДНА в СКС $\mathbf{l} = \left\{ \cos\beta_0 \quad \sqrt{1 - \cos^2\beta_0 - \cos^2\gamma_0} \quad -\cos\gamma_0 \right\}^T$ (при $0 \leq \beta_0 < \pi, 0 \leq \gamma_0 < \pi/2$). В ГСК этот вектор обозначим $\mathbf{k} = \{k_1 \quad k_2 \quad k_3\}^T = \mathbf{W}^{-1} \cdot \mathbf{l}$. Подставляя координаты произвольной точки $\mathbf{R} = \{X \quad Y \quad Z\}^T$ прямой $\mathbf{R} = \mathbf{R}_{\text{ФЦА}} + s\mathbf{k}, s \geq 0$, в уравнение эллипсоида, получаем квадратное уравнение относительно параметра s

$$a_0 s^2 + a_1 s + a_2 = 0,$$

где $a_0 = \frac{k_1^2}{(a+h)^2} + \frac{k_2^2}{(a+h)^2} + \frac{k_3^2}{(b+h)^2};$

$$a_1 = 2 \left(\frac{X_{\text{ФЦА}} k_1}{(a+h)^2} + \frac{Y_{\text{ФЦА}} k_2}{(a+h)^2} + \frac{Z_{\text{ФЦА}} k_3}{(b+h)^2} \right);$$

$$a_2 = \frac{X_{\text{ФЦА}}^2}{(a+h)^2} + \frac{Y_{\text{ФЦА}}^2}{(a+h)^2} + \frac{Z_{\text{ФЦА}}^2}{(b+h)^2} - 1.$$

Ближайший к нулю положительный корень

$$s^{\text{Q}_0} = \frac{-a_1 - \sqrt{a_1^2 - 4a_0 a_2}}{2a_0}$$

соответствует точке прицеливания на поверхности эллипсоида

$$Q_0(X^{\text{Q}_0}, Y^{\text{Q}_0}, Z^{\text{Q}_0}), \quad \text{где} \quad X^{\text{Q}_0} = X_{\text{ФЦА}} + s^{\text{Q}_0} k_1, \\ Y^{\text{Q}_0} = Y_{\text{ФЦА}} + s^{\text{Q}_0} k_2, \quad Z^{\text{Q}_0} = Z_{\text{ФЦА}} + s^{\text{Q}_0} k_3.$$

Определение координат угловых точек кадра

Пусть $\mathbf{N} = \left\{ \frac{X^{\text{Q}_0}}{(a+h)^2}, \frac{Y^{\text{Q}_0}}{(a+h)^2}, \frac{Z^{\text{Q}_0}}{(b+h)^2} \right\}^T$ и

$\mathbf{n} = \mathbf{N} / |\mathbf{N}|$ — вектор нормали к эллипсоиду в точке прицеливания. Уравнение касательной плоскости в этой точке в ГСК $\langle \mathbf{n}, \mathbf{R} - \mathbf{R}^{\text{Q}_0} \rangle = 0$

запишем в СКС. Пусть $\mathbf{m} = \mathbf{W} \cdot \mathbf{n}$, $\mathbf{r} = \mathbf{W} \cdot (\mathbf{R} - \mathbf{R}^{\text{Q}_0})$, $\mathbf{r}^{\text{Q}_0} = \mathbf{W} \cdot (\mathbf{R}^{\text{Q}_0} - \mathbf{R}^{\text{O}})$. Уравнение касательной плоскости в СКС примет вид $\langle \mathbf{m}, \mathbf{r} - \mathbf{r}^{\text{Q}_0} \rangle = 0$. Построим в касательной плоскости систему координат UQV с началом в точке касания и соответствующий ортонормированный базис $\boldsymbol{\tau}_u, \boldsymbol{\tau}_v$, где

$\boldsymbol{\tau}_v = (\mathbf{l} \times \mathbf{m}) / |\mathbf{l} \times \mathbf{m}|$, $\boldsymbol{\tau}_u = \mathbf{m} \times \boldsymbol{\tau}_v$. Угловым точкам $Q^{00}, Q^{01}, Q^{10}, Q^{11}$ (см. рис. 3) соответствуют радиус-векторы

$$\mathbf{r}^{\text{Q}_0} = \mathbf{r}^{\text{Q}_0} - (\Delta_u / 2) \boldsymbol{\tau}_u - (\Delta_v / 2) \boldsymbol{\tau}_v,$$

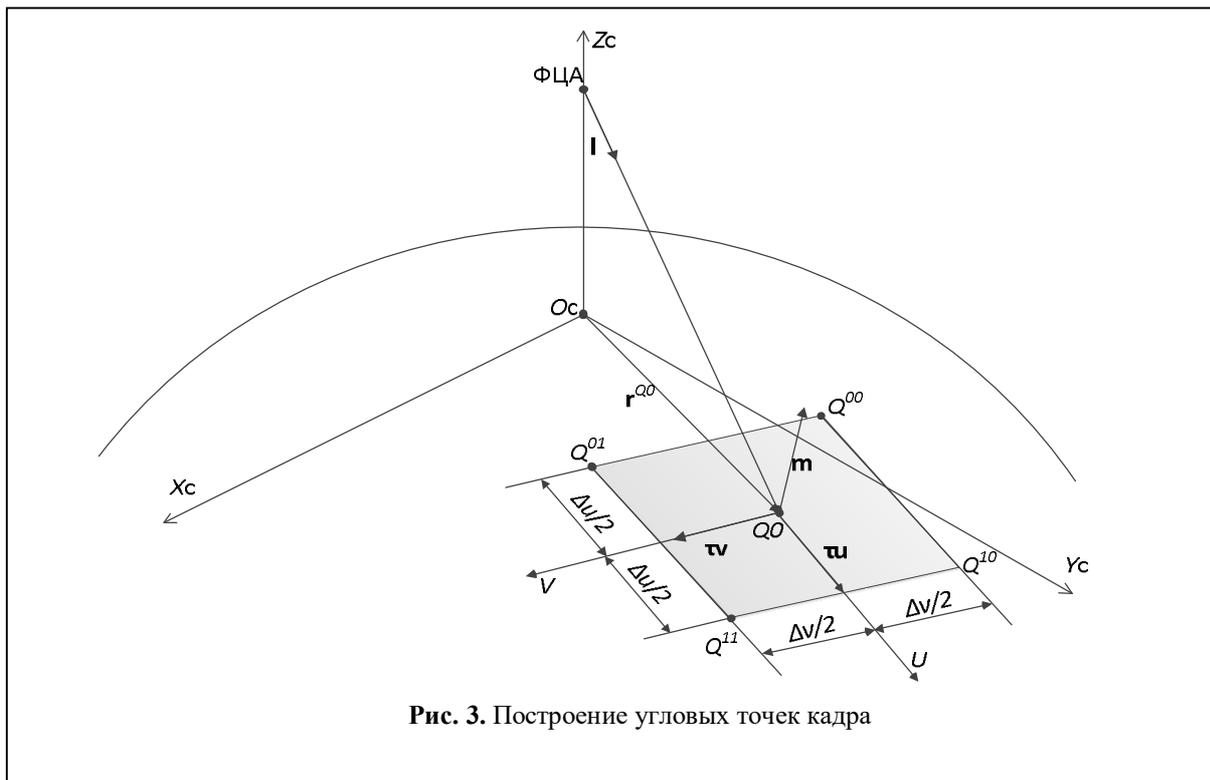


Рис. 3. Построение угловых точек кадра

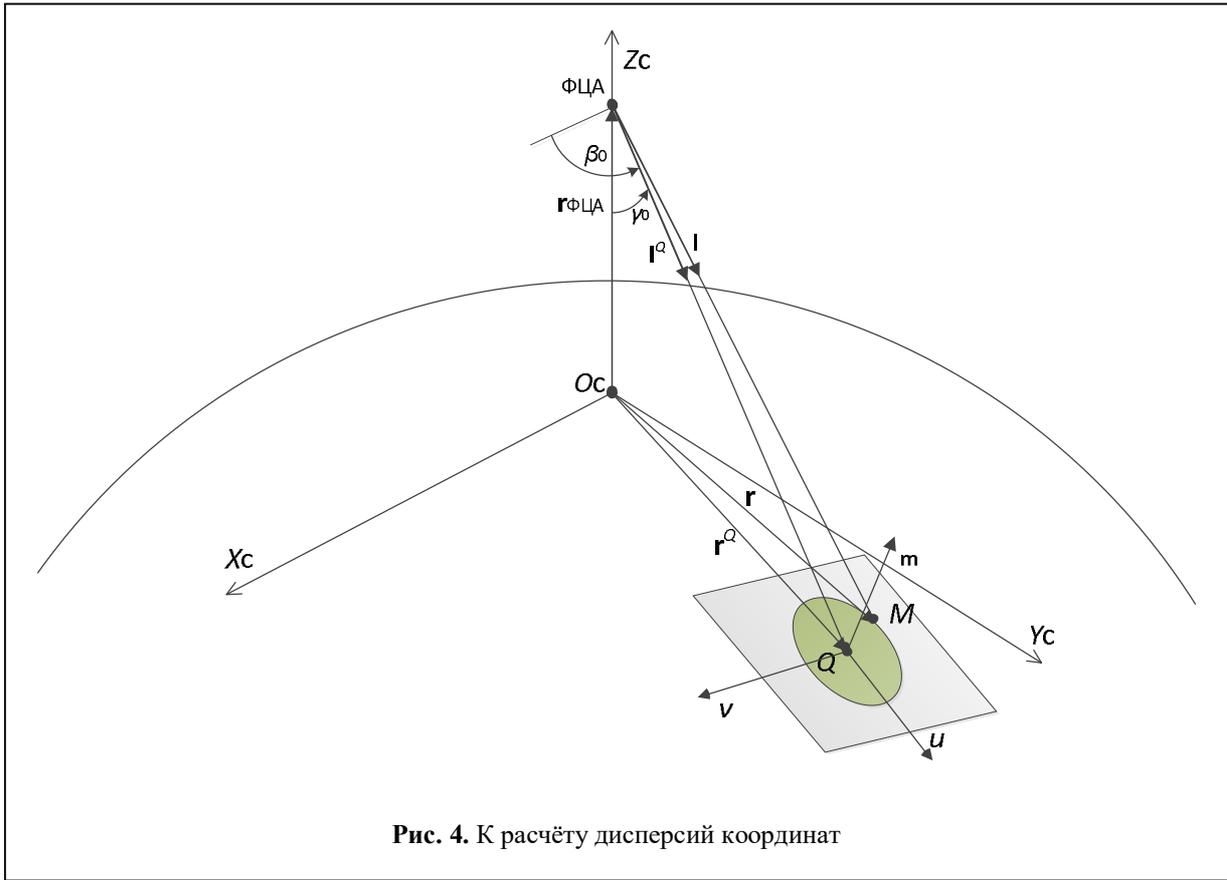


Рис. 4. К расчёту дисперсий координат

$$\mathbf{r}^{01} = \mathbf{r}^{Q_0} - (\Delta_u / 2) \boldsymbol{\tau}_u + (\Delta_v / 2) \boldsymbol{\tau}_v,$$

$$\mathbf{r}^{10} = \mathbf{r}^{Q_0} + (\Delta_u / 2) \boldsymbol{\tau}_u - (\Delta_v / 2) \boldsymbol{\tau}_v,$$

$$\mathbf{r}^{11} = \mathbf{r}^{Q_0} + (\Delta_u / 2) \boldsymbol{\tau}_u + (\Delta_v / 2) \boldsymbol{\tau}_v,$$

где $\Delta_u \times \Delta_v$ — размеры области съёмки.

Статистика ошибок координат точки прицеливания

Будем считать оценки углов ориентации оси ДНА некоррелированными случайными величинами β, γ со средними значениями $\bar{\beta}, \bar{\gamma}$ и дисперсиями $\sigma_\beta^2, \sigma_\gamma^2$ (они могут быть коррелированы, но коэффициент корреляции определяется конструкцией КА и нам не известен). Найдём зависимость среднего и дисперсии координат точки прицеливания от среднего и дисперсии этих углов. Пусть средним значениям оценок углов соответствует точка Q (см. рис. 4). Построим касательную плоскость к эллипсоиду в точке Q : $\langle \mathbf{n}, \mathbf{R} - \mathbf{R}^Q \rangle = 0$, где

$$\mathbf{n} = \left\{ \frac{X^Q}{a^2}, \frac{Y^Q}{a^2}, \frac{Z^Q}{b^2} \right\}^T$$

и найдем точку M пересечения оси ДНА с этой плоскостью. Пусть $\mathbf{g}_x, \mathbf{g}_y, \mathbf{g}_z$ ортонормированный базис в ГСК.

Тогда $\mathbf{W} = \left\| \langle \mathbf{g}_\lambda, \mathbf{f}_\mu \rangle \right\|_{\lambda, \mu = x, y, z}$ матрица преобразования координат от ГСК к СКС.

Обозначим векторы с координатами в СКС $\mathbf{m} = \mathbf{W} \cdot \mathbf{n}$,

$$\mathbf{l} = \mathbf{W} \cdot \mathbf{k}, \quad \mathbf{l}^Q = \mathbf{W} \cdot \mathbf{k}^Q, \quad \mathbf{r} = \mathbf{W} \cdot (\mathbf{R} - \mathbf{R}^Q),$$

$$\mathbf{r}^Q = \mathbf{W} \cdot (\mathbf{R}^Q - \mathbf{R}^Q), \quad \mathbf{r}_{\PhiЦА} = \mathbf{W} \cdot (\mathbf{R}_{\PhiЦА} - \mathbf{R}^Q).$$

Уравнение касательной плоскости в СКС примет вид $\langle \mathbf{m}, \mathbf{r} - \mathbf{r}^Q \rangle = 0$. Подставляя сюда,

как и выше, уравнение смещённой оси ДНА $\mathbf{r} = \mathbf{r}_{\PhiЦА} + s \mathbf{l}$, $s \geq 0$, получим значение параметра

$$s = s^Q = \frac{\langle \mathbf{m}, \mathbf{l}^Q \rangle}{\langle \mathbf{m}, \mathbf{l} \rangle},$$

соответствующее точке M на касательной плоскости (значение s^Q было найдено ранее). Представляя вектор-функцию

Таблица 1. Коэффициенты $\sqrt{\rho_{11}}$ и $\sqrt{\rho_{22}}$ при разных средних значениях угла наклона антенны

$\bar{\gamma}$, град	20	40	60
$\sqrt{\rho_{11}}$, м	644 240	825 431	1 379 961
$\sqrt{\rho_{22}}$, м	696 903	1 185 476	3 975 263

Таблица 2. Предельные значения стандартных отклонений значений углов антенны при допустимой погрешности координат точки прицеливания 20 м

$\bar{\gamma}$, град	20	40	60
σ_{β}^{max} , град	0,000593	0,000463	0,000277
σ_{γ}^{max} , град	0,000548	0,000322	0,000096

$\mathbf{r} = \mathbf{r}(\beta, \gamma) = \{x(\beta, \gamma) \ y(\beta, \gamma) \ z(\beta, \gamma)\}^T$ приближённым выражением и вычисляя производные, получаем

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}(\bar{\beta}, \bar{\gamma}) + \mathbf{r}'_{\beta}(\bar{\beta}, \bar{\gamma})(\beta - \bar{\beta}) + \mathbf{r}'_{\gamma}(\bar{\beta}, \bar{\gamma})(\gamma - \bar{\gamma}),$$

где $\mathbf{r}(\bar{\beta}, \bar{\gamma}) = \mathbf{r}_{\Phi_{ЦА}} + s^{\varrho} \mathbf{l}^{\varrho}$,

$$\mathbf{r}'_{\beta}(\bar{\beta}, \bar{\gamma}) = s^{\varrho} \frac{\mathbf{l}'_{\beta}{}^{\varrho} \langle \mathbf{m}, \mathbf{l}^{\varrho} \rangle - \mathbf{l}^{\varrho} \langle \mathbf{m}, \mathbf{l}'_{\beta}{}^{\varrho} \rangle}{\langle \mathbf{m}, \mathbf{l}^{\varrho} \rangle},$$

$$\mathbf{r}'_{\gamma}(\bar{\beta}, \bar{\gamma}) = s^{\varrho} \frac{\mathbf{l}'_{\gamma}{}^{\varrho} \langle \mathbf{m}, \mathbf{l}^{\varrho} \rangle - \mathbf{l}^{\varrho} \langle \mathbf{m}, \mathbf{l}'_{\gamma}{}^{\varrho} \rangle}{\langle \mathbf{m}, \mathbf{l}^{\varrho} \rangle},$$

$$\mathbf{l}^{\varrho} = \left\{ \begin{array}{c} \cos \bar{\beta} \\ \sqrt{1 - \cos^2 \bar{\beta} - \cos^2 \bar{\gamma}} \\ -\cos \bar{\gamma} \end{array} \right\},$$

$$\mathbf{l}'_{\beta}{}^{\varrho} = \left\{ \begin{array}{c} -\sin \bar{\beta} \\ \sin \bar{\beta} \cos \bar{\beta} \\ \sqrt{1 - \cos^2 \bar{\beta} - \cos^2 \bar{\gamma}} \\ 0 \end{array} \right\},$$

$$\mathbf{l}'_{\gamma}{}^{\varrho} = \left\{ \begin{array}{c} 0 \\ \sin \bar{\gamma} \cos \bar{\gamma} \\ \sqrt{1 - \cos^2 \bar{\beta} - \cos^2 \bar{\gamma}} \\ \sin \bar{\gamma} \end{array} \right\}.$$

Обозначая $\Delta \mathbf{r} = \mathbf{r} - \mathbf{r}(\bar{\beta}, \bar{\gamma})$, имеем для смещений прицельной точки в касательной плоскости $v = \langle \Delta \mathbf{r}, \boldsymbol{\tau}_v \rangle$, $u = \langle \Delta \mathbf{r}, \boldsymbol{\tau}_u \rangle$ и для соответствующих дисперсий выражения:

$$\sigma_v^2 = \langle \mathbf{r}'_{\beta}(\bar{\beta}, \bar{\gamma}), \boldsymbol{\tau}_v \rangle^2 \sigma_{\beta}^2 + \langle \mathbf{r}'_{\gamma}(\bar{\beta}, \bar{\gamma}), \boldsymbol{\tau}_v \rangle^2 \sigma_{\gamma}^2 = \rho_{11} \sigma_{\beta}^2 + \rho_{12} \sigma_{\gamma}^2,$$

$$\sigma_u^2 = \langle \mathbf{r}'_{\beta}(\bar{\beta}, \bar{\gamma}), \boldsymbol{\tau}_u \rangle^2 \sigma_{\beta}^2 + \langle \mathbf{r}'_{\gamma}(\bar{\beta}, \bar{\gamma}), \boldsymbol{\tau}_u \rangle^2 \sigma_{\gamma}^2 = \rho_{21} \sigma_{\beta}^2 + \rho_{22} \sigma_{\gamma}^2.$$

Результаты расчётов

Расчёты показывают, что значения коэффициентов ρ_{12} и ρ_{21} при средних значениях угла $\bar{\beta} = 90^{\circ} \pm 1^{\circ}$ составляют не более 0.1% от величин коэффициентов ρ_{11} и ρ_{22} , и можно пользоваться упрощёнными формулами для стандартных отклонений значений координат

$$\sigma_v = \sqrt{\rho_{11}} \sigma_{\beta}, \quad \sigma_u = \sqrt{\rho_{22}} \sigma_{\gamma}.$$

В таблице 1 приведены рассчитанные коэффициенты пропорциональности $\sqrt{\rho_{11}}$ и $\sqrt{\rho_{22}}$ при разных средних значениях углов $\bar{\gamma}$ (высота орбиты 600 км).

В частности, если задаться предельным значением ошибки определения координат точки прицеливания в 20 м по азимуту и по дальности, то, учитывая «правило 3-х сигма», найдём предельные значения ошибок углов антенны при разных углах наклона (таблица 2).

Выводы

Проделанные вычисления показывают, что если высота орбиты 600 км, и угол места не пре-

вышает 60^0 , точности определения координат точки прицеливания в 20 м соответствует уровень стандартных отклонений углов ориентации порядка 10^{-4} градуса.

Литература

1. Верба В.С., Неронский Л.Б., Осипов И.Г., Турук В.Э. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования / Под ред. В.С. Вербы. М.: Радиотехника, 2010. 680 с.
2. Груздов В.В. и др. Новые технологии дистанционного зондирования Земли из космоса. М.: Техносфера, 2020. 482 с.
3. Iwata T., Shimada M. Precision Orbit Control of

the Advanced Land Observing Satellite (ALOS) for SAR Interferometry // Trans. JSASS Space Tech. Japan. Vol. 7. DOI: 10.2322/tstj.7.Td_19.

4. Lee S., Park S.-Y., Kim J., Ka M.-H., Song Y. Mission Design and Orbit-Attitude Control Algorithms Development of Multistatic SAR Satellites for Very-High-Resolution Stripmap Imaging. Aerospace, 2023, Vol. 10. No. 33. DOI: 10.3390/aerospace10010033.
5. Огородова Л.В. Высшая геодезия. Часть III. Теоретическая геодезия. Учебник для вузов. М.: Геодезкартиздат, 2006. 384 с.
6. Комаровский Ю.А. Использование различных референц-эллипсоидов в судовождении. Учеб. пособие. Владивосток: Мор. гос. ун-т, 2005. 341 с.

Поступила 17 мая 2023 г.

English

POINT POSITION COORDINATES' DETERMINATION FOR SYNTHETIC-APERTURE RADAR ANTENNA OF SPACECRAFT

Vladimir Sergeevich Fedorov — PhD, the Head of Laboratory, Corporation Phasotron-NIIR.

E-mail: fedorov@phasotron.com

Address: 115516, Moscow, Kavkazsky b., 59, str. 1.

Abstract: The article is concerned with a space vehicle that performs remote sensing of the Earth surface. The survey assignment contains the geodetic coordinates of the object: latitude, longitude and object height. The sighting point is determined as the intersection of antenna pattern (AP) axis of space vehicle with ellipsoid surface comprising the survey object. The task is to define error allowances in setting AP axis angles considering the input restrictions on error limit of the point position coordinates for antenna sighting. The synthesis coordinate system (SCS) is defined where the antenna angular positions are specified. There are calculated point position coordinates for antenna sighting in Greenwich Coordinate System (GCS), as well as the center and corner points of RI (radar image) frame in SCS. This is required for the coordinate referencing of synthetic radar image. There was obtained a linear approximation dependence of sighting bias dispersions in the plane tangent to the ellipsoid surface on angle values' dispersions of the antenna axis on the hypothesis that the angle estimates of AP orientation axis are uncorrelated variates. Calculation results are presented indicating, in particular, that if SV (space vehicle) orbital altitude is 600 km, AP elevation is 60 degrees, and error limit of the point position for antenna sighting of the aiming point is 20 m in azimuth and range, then it will be required to ensure standard deviations' level of about 0.0001 degrees for antenna axis orientation angles.

Keywords: space vehicle, antenna pattern, phase center, azimuth angle, elevation, Greenwich Coordinate System, synthesis coordinate system, Earth ellipsoid.

References

1. Verba V.S., Neronsky L.B., Osipov I.G., Turuk V.E. Space-based ground survey radar systems / Edited by V.S. Verba. Moscow: Raditehnika. 2010. 680 p.
2. Gruzdov V.V. et al. New technologies of remote sensing of the Earth from space. Moscow: Technosphera, 2020. 482 p.
3. Iwata T., Shimada M. Precision Orbit Control of the Advanced Land Observing Satellite (ALOS) for SAR Interferometry // Trans. JSASS Space Tech. Japan. Vol. 7. DOI: 10.2322/tstj.7.Td_19.
4. Lee S., Park S.-Y., Kim J., Ka M.-H., Song Y. Mission Design and Orbit-Attitude Control Algorithms Development of Multistatic SAR Satellites for Very-High-Resolution Stripmap Imaging. Aerospace, 2023, Vol. 10. No. 33. DOI: 10.3390/aerospace10010033.
5. Ogorodova L.V. Higher geodesy. Part III. Theoretical geodesy. Textbook for universities. Moscow: Geodezkartizdat, 2006. 384 p.
6. Komarovskiy Yu.A. The use of various reference ellipsoids in navigation. Study guide. Vladivostok: Maritime State University, 2005. 341 p.