

Всероссийская открытая научная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн» - «Муром 2020»

К вопросу о точности определения координат наблюдаемых объектов в космической РСА

В.В. Костров, М.П. Титов, Е.Ф. Толстов, В.С. Фёдоров

МИ ВлГУ, 602264, г. Муром, Владимирская обл., ул. Орловская, 23. E-mail: vyk@mit.ru
АО «Аэрокон», 140187, г. Жуковский, МО, ул. Жуковского, 1. E-mail: MP_Titov@mail.ru

В докладе представлена методика расчета погрешностей определения координат центра точки наведения луча антенны радиолокатора с синтезированием апертуры антенны (РСА) космического базирования. Рассмотрены основные системы координат, используемые при расчете полетного задания на съемку. Предложена методика расчета координат точки прицеливания с учетом рельефа местности. В линейном приближении получены расчетные соотношения для определения дисперсии или среднеквадратического отклонения координатных функций. Полученные результаты могут быть использованы при задании требований по навигационному обеспечению космических аппаратов, а также при проектировании режимов съемки в процессе дистанционного зондирования Земли.

The report presents a method for calculating errors in determining the coordinates of the center of the pointing point of the radar antenna beam with the synthesis of the space-based antenna aperture (RSA). The main coordinate systems used in calculating the flight task for shooting are considered. A method is proposed for calculating the coordinates of the aiming point taking into account the terrain. In a linear approximation, calculated relations are obtained for determining the variance or standard deviation of coordinate functions. The results obtained can be used for setting requirements for navigation support of spacecraft, as well as for designing shooting modes in the process of remote sensing of the Earth.

Введение

На радиолокационные средства приходится до 30% всех решаемых при дистанционном зондировании Земли задач. При этом возможности и режимы съемки радиолокатора с синтезированием апертуры антенны (РСА) во многом определяются орбитой, на которую выведен космический аппарат (КА) – носитель радиолокатора [1]. Возмущенное движение КА приводит к снижению пространственного разрешения, качества синтезирования радиолокационного изображения (РЛИ) и, как следствие, некоторой потере ценности получаемой информации. Для повышения качества синтеза РЛИ в [2] предложена система координат синтезирования и построена аппроксимация траектории КА, которая позволяет учесть фазовые погрешности опорной функции для согласованной фильтрации траекторного сигнала. В сочетании с автофокусировкой это позволяет провести более высококачественный синтез РЛИ. Особые требования предъявляются к точности установки максимума диаграммы направленности антенны, которая определяет зону съемки, а также оказывает влияние на базовые параметры передатчика и приемника РСА [3]. Измерение угла установки оптической оси антенны позволяет уточнить параметры зондирующих импульсов, строга окна приемника и в конечном итоге снизить уровень помех, возникающих при синтезировании РЛИ и вызываемых неоднозначностью принимаемых РСА сигналов.

В связи с важной ролью системы позиционирования луча и ориентации КА интерес к навигационно-баллистическому обеспечению не ослабевает. Наряду с разработкой общих рекомендаций по установке на КА макронавигационной аппаратуры позиционирования типа ГЛОНАСС, GPS, Galileo [1], определяются специфические требования к системам микронавигации, которые важны для достижения высокого (субметрового) разрешения РСА. На примере РСА авиационного базирования такая задача рассматривалась в [4].

Вместе с тем от корректности установки луча и КА во многом зависит успех всей съемки, поскольку погрешности установки угла визирования могут привести к заметному смещению объекта съемки в кадре, а в критических случаях – к его выходу за пределы кадра. Цель работы – изучить влияние угловых погрешностей установки антенны на величину ошибок выбора центра и угловых координат кадра съемки при геолокации.

Задание на съемку содержит, как правило, географические координаты: широту φ и долготу λ объекта съемки. 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 съемки определено тройкой чисел (φ, λ, h) .

В соответствии с заданием на съемку определяется момент времени t_0 , соответствующий минимальному расстоянию от космического аппарата (КА) на орбите до центра кадра. Для момента времени t_0 по данным навигационно-баллистического обеспечения (НБО) рассчитываются и выдаются в числе прочих следующие параметры:

- вектор $R = \{X_{KA} \ Y_{KA} \ Z_{KA}\}^T$ координат центра масс (ЦМ) КА в гринвичской системе координат (ГСК),
- вектор $V = \{V_x \ V_y \ V_z\}^T$ путевой скорости КА в ГСК.

Положение объекта съемки 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 соответствующее положение точки прицеливания, т.е. точки пересечения линии визирования с поверхностью земного эллипсоида. При наличии таблицы высот h можно существенно улучшить точность определения положения точки прицеливания по дальности, но мы пока не будем учитывать высоту.

Системы координат

Объект съемки задается в геодезической эллипсоидальной системе координат (ГЭСК). Отличие ГЭСК от сферических координат заключается в определении широты [5,6]. Здесь 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, путевая система координат (ПСК) и СКС. Ось $O_c Z_c$ СКС проводится через фазовый центр антенны (ФЦА), соответственно, положение ФЦА должно быть задано. Будем считать, что уже заданы координаты ФЦА в ГСК в момент времени t_0 .

Расчет координат точки прицеливания

Рассмотрим кратко методику расчета координат точки прицеливания и основные этапы ее реализации.

1. Вычисление координат в ГСК

Вычисление основных координат в ГСК заданной точки прицеливания $P_0(X^{P_0}, Y^{P_0}, Z^{P_0})$ на высоте h над поверхностью земного эллипсоида производится по соотношению

$$X^{P_0} = (N + h)\cos\varphi\cos\lambda, \quad Y^{P_0} = (N + h)\cos\varphi\sin\lambda, \quad Z^{P_0} = (N + h - Ne^2)\sin\varphi,$$

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.

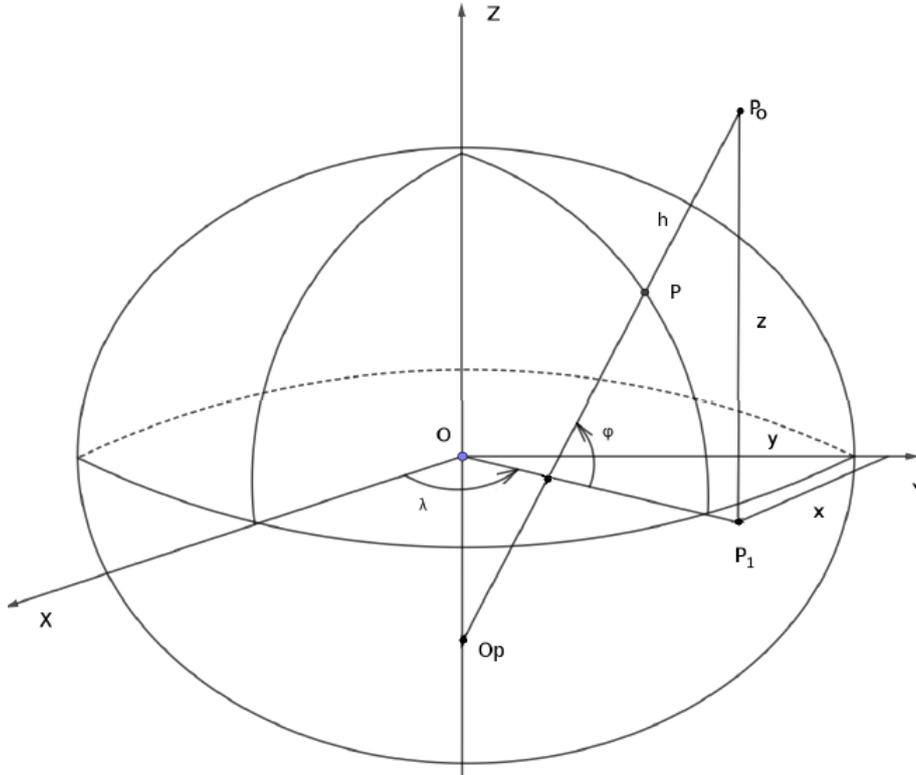


Рис. 1. Геодезическая эллипсоидальная система координат

2. Построение ПСК

При расчете положения точки прицеливания ПСК непосредственно не используется. Однако, как было сказано выше, она может понадобиться, например, для определения координат ФЦА. Поэтому приводим соответствующее построение. Найдем координаты начала и направляющих векторов ПСК в ГСК. Начало координат ПСК в ЦМ КА $O_n(X_{KA}, Y_{KA}, Z_{KA})$. Ось O_nX_n ПСК принадлежит плоскости, ортогональной вектору R и направлена вдоль проекции на эту плоскость вектора путевой скорости V , ось O_nY_n направлена по вектору R , ось O_nZ_n дополняет систему координат до право ориентированной. В соответствии с этим, определим единичные направляющие векторы осей ПСК как $e_y = R/|R|$, $e_z = \frac{V \times e_y}{|V \times e_y|}$, $e_x = e_y \times e_z$.

3. Построение СКС

Пусть $R_{\PhiЦА} = \{X_{\PhiЦА} \ Y_{\PhiЦА} \ Z_{\PhiЦА}\}^T$ положение ФЦА в ГСК в момент времени t_0 . Найдем координаты начала СКС $O_c(X_c, Y_c, Z_c)$. Направляющий вектор оси O_cZ_c СКС $f_z = R_{\PhiЦА}/|R_{\PhiЦА}|$. Положение точки O_c задается вектором $R^O = R_{\PhiЦА} + \left\| \left(R^{P_0} - R_{\PhiЦА} \right) f_z \right\|$, где $R^{P_0} = \{X^{P_0} \ Y^{P_0} \ Z^{P_0}\}^T$. Направляющие векторы

осей $O_c Y_c$ и $O_c X_c$ определим как $f_y = (R^{P_0} - R^O) / |R^{P_0} - R^O|$ и $f_x = f_y \times f_z$ соответственно (см. рис. 2).

4. Вычисление координат в ГСК фактической точки прицеливания

Предположим, что получены оценки реализованных углов визирования азимута β_0 и места γ_0 , определяющих положение оси ДНА. Требуется найти координаты в ГСК точки пересечения оси ДНА, соответствующей этим значениям углов, с поверхностью, которой принадлежит точка $P_0(X^{P_0}, Y^{P_0}, Z^{P_0})$. В качестве такой поверхности возьмем эллипсоид, задаваемый уравнением

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

Пусть g_x, g_y, g_z – ортонормированный базис в ГСК. Тогда $W = \|g_\lambda, f_\mu\|_{\lambda, \mu=x, y, z}$ – матрица преобразования координат от ГСК к СКС. Единичный направляющий вектор оси ДНА в СКС $l = \left\{ \cos \beta_0, \sqrt{1 - \cos^2 \beta_0 - \cos^2 \gamma_0}, -\cos \gamma_0 \right\}^T$ при $0 \leq \beta_0 < \pi$, $0 \leq \gamma_0 < \pi/2$. В ГСК этот вектор обозначим $k = \{k_1, k_2, k_3\}^T = W^{-1} l$. Подставляя координаты произвольной точки $R = \{X, Y, Z\}^T$ прямой в уравнение эллипсоида, получаем квадратное уравнение относительно параметра s

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

$$\text{где } a_0 = \frac{k_1^2}{(a+h)^2} + \frac{k_2^2}{(a+h)^2} + \frac{k_3^2}{(b+h)^2}, \quad a_1 = 2 \left(\frac{X_{\PhiЦА} k_1}{(a+h)^2} + \frac{Y_{\PhiЦА} k_2}{(a+h)^2} + \frac{Z_{\PhiЦА} k_3}{(b+h)^2} \right),$$

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

Ближайший к нулю положительный корень $s^{Q_0} = \frac{-a_1 - \sqrt{a_1^2 - 4a_0 a_2}}{2a_0}$

соответствует точке прицеливания на поверхности эллипсоида $Q_0(X^{Q_0}, Y^{Q_0}, Z^{Q_0})$, где $X^{Q_0} = X_{\PhiЦА} + s^{Q_0} k_1$, $Y^{Q_0} = Y_{\PhiЦА} + s^{Q_0} k_2$, $Z^{Q_0} = Z_{\PhiЦА} + s^{Q_0} k_3$.

5. Определение координат угловых точек кадра

Пусть $N = \left\{ \frac{X^{Q_0}}{(a+h)^2}, \frac{Y^{Q_0}}{(a+h)^2}, \frac{Z^{Q_0}}{(b+h)^2} \right\}^T$ и $n = N/|N|$ – вектор нормали к эллипсоиду

в точке прицеливания. Уравнение касательной плоскости в этой точке в ГСК $\langle n, R - R^{Q_0} \rangle = 0$ запишем в СКС. Пусть $m = W n$, $r = W (R - R^O)$, $r^{Q_0} = W (R^{Q_0} - R^O)$

Уравнение касательной плоскости в СКС примет вид $\langle m, r - r^{Q_0} \rangle = 0$. Построим в

Статистика ошибок определения координат

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 нам не известен). Найдем 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 : $\langle n, R - R^Q \rangle = 0$,

где $n = \left\{ \frac{X^Q}{a^2}, \frac{Y^Q}{a^2}, \frac{Z^Q}{b^2} \right\}^T$ и найдем точку M пересечения оси ДНА с этой плоскостью.

Пусть g_x, g_y, g_z ортонормированный базис в ГСК. Тогда $W = \|g_\lambda, f_\mu\|_{\lambda, \mu=x,y,z}$ матрица преобразования координат от ГСК к СКС. Обозначим векторы с координатами в СКС $m = W \cdot n$, $l = W \cdot k$, $l^Q = W \cdot k^Q$, $r = W \cdot (R - R^O)$, $r^Q = W \cdot (R^Q - R^O)$, $r_{\PhiЦА} = W \cdot (R_{\PhiЦА} - R^O)$. Уравнение касательной плоскости в СКС примет вид $\langle m, r - r^Q \rangle = 0$. Подставляя сюда, как и выше, уравнение смещенной оси ДНА, получим

значение параметра $s = s^Q \frac{\langle m, l^Q \rangle}{\langle m, l \rangle}$, соответствующее точке M на касательной

плоскости (значение s^Q было найдено ранее).

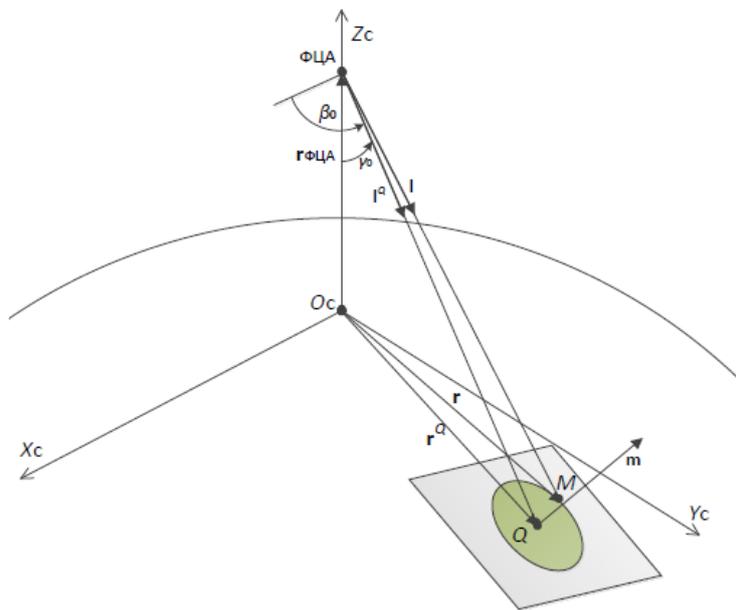


Рис. 4. К расчету дисперсий координат

Представляя вектор-функцию $r = r(\beta, \gamma) = \{x(\beta, \gamma) \ y(\beta, \gamma) \ z(\beta, \gamma)\}^T$ приближенным выражением и вычисляя производные, получаем

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

$$\text{где } r'_\beta(\bar{\beta}, \bar{\gamma}) = s^Q \frac{l'_\beta \langle m, l^Q \rangle - l^Q \langle m, l'_\beta \rangle}{\langle m, l^Q \rangle}, \quad r'_\gamma(\bar{\beta}, \bar{\gamma}) = s^Q \frac{l'_\gamma \langle m, l^Q \rangle - l^Q \langle m, l'_\gamma \rangle}{\langle m, l^Q \rangle},$$

$$l^Q = \left\{ \cos \bar{\beta} \sqrt{\sin^2 \bar{\beta} - \cos^2 \bar{\gamma}} - \cos \bar{\gamma} \right\}^2.$$

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

$$\sigma_u^2 = \langle r'_\beta(\bar{\beta}, \bar{\gamma}), \tau_u \rangle^2 \sigma_\beta^2 + \langle r'_\gamma(\bar{\beta}, \bar{\gamma}), \tau_u \rangle^2 \sigma_\gamma^2,$$

$$\sigma_v^2 = \langle r'_\beta(\bar{\beta}, \bar{\gamma}), \tau_v \rangle^2 \sigma_\beta^2 + \langle r'_\gamma(\bar{\beta}, \bar{\gamma}), \tau_v \rangle^2 \sigma_\gamma^2.$$

Полученная система уравнений полностью описывает взаимосвязь точности определения центра кадра при радиолокационной съемке с точностью позиционирования антенны.

Выводы

1. Рассмотрение различных взаимосвязанных систем координат – системы координат синтезирования, путевой системы координат, гринвичской системы координат – позволило по соответствующим оценкам углов визирования определить положение фактической точки прицеливания и сравнить его с заданным к реализации.

2. Показано, что особое внимание необходимо уделять свойствам ошибок оценивания углов визирования в угломестной и азимутальной плоскостях как базовых статистических характеристик для решения задачи оценки погрешностей определения координат целей в космических РСА. При их использовании ошибки позиционирования точки прицеливания можно представить в виде трех составляющих, по которым достаточно легко восстановить эллипсоид ошибок и оценить смещение получаемого РЛИ относительно заданного к съёмке фрагмента местности.

3. Полученные соотношения можно эффективно использовать при навигационно-баллистических расчетах полетной программы и кинематики съемки, а также при определении требований к макро и микро навигационным системам обеспечения космического аппарата.

Литература

1. Верба В.С., Неронский Л.Б., Осипов И.Г., Турук В.Э. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования / Под общей ред. В.С. Вербы – М.: Радиотехника, 2010.
2. Зайцев С.Э. Навигационно-баллистическое обеспечение малого космического аппарата «Кондор-Э» как носителя РСА радиовидения // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2017. № 3.
3. Зайцев С.Э., Карпов О.А. Измерение угла установки оси диаграммы направленности антенны космических РСА в вертикальной плоскости // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2017. № 4.
4. Бабокин М.И., Карпов О.А., Толстов Е.Ф., Бабиченко А.В., Краснов В.В., Некрасов А.В. Требования к современным системам микронавигационного обеспечения РСА // Всероссийские открытые Армандовские чтения. Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн /

Материалы Всероссийской открытой научной конференции (Муром, 28-30 мая 2019 г.). – Муром: ИПЦ МИ ВлГУ, 2019.

5. Иванов Н.М., Лысенко Л.Н. Баллистика и навигация космических аппаратов: Учебник для вузов. – М.; Дрофа, 2004.
6. Зеленцов В.В., Казаковцев В.П. Основы баллистического проектирования искусственных спутников Земли: Учебное пособие. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012.