

МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ В РАДИОМЕТРИЧЕСКИХ МАТРИЧНЫХ КОРРЕЛЯЦИОННО-ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ НАВИГАЦИИ

д.т.н. В.И. Антюфеев, к.т.н. В.Н. Быков, А.М. Гричанюк,
д.т.н., проф. А.С. Черепнёв

Описана модель формирования изображений бортовыми радиометрическими системами навигации летательных аппаратов. В процессе моделирования могут быть оценены среднеквадратические ошибки определения координат и вероятность правильной привязки летательных аппаратов к наземным ориентирам.

Корреляционно-экстремальные системы навигации летательных аппаратов (КЭСН ЛА), как правило, используются для периодической коррекции более грубой инерциальной системы навигации (ИСН). Принцип действия КЭСН основан на определении положения текущего изображения (ТИ), полученного с помощью бортового датчика какого-либо физического поля Земли, относительно эталонного изображения (ЭИ), сформированного заранее по результатам обработки аэрофотоснимков или цифровых карт местности района коррекции. В радиометрических матричных КЭСН ТИ формируется с помощью многолучевой матричной антенны и многоканального приемника.

На этапе разработки КЭСН большое значение придается моделированию как ТИ, так и ЭИ из различных положений ЛА относительно района коррекции и под разными углами визирования. Создание модели является необходимым условием решения таких задач, как синтез ЭИ, отработка и испытание алгоритмов сопоставления ТИ и ЭИ, оценка их устойчивости к искажениям ТИ, обоснование требований к точности юстировки антенны и точности определения углов крена, тангажа и рысканья ЛА с помощью ИСН. Желательно, чтобы обеспечивалась возможность моделирования изображений по распределению радиоярких температур в районе коррекции, заданному в виде растрового изображения.

Цель работы заключается в разработке модели формирования текущих изображений в КЭСН, удовлетворяющей предъявленным требованиям.

Пусть в целевой системе координат (СК), связанной с поверхностью Земли и расположенной на ней целью таким образом, что ось z направлена по местной вертикали, а оси x, y лежат в касательной плоскости; в плоскости $z = 0$ задано поле радиотеплового рельефа $T(x, y)$ в

районе коррекции. Полагаем, что в момент съема кадра ТИ известны координаты центра масс ЛА (x_0, y_0, z_0) и направляющие косинусы d^{ij} каждого из лучей многоканальной антенны. Пусть парциальная диаграмма направленности антенны (ДНА) $G_{ij}(\theta, \varphi)$ для некоторого ij -го луча задана в локальной СК $(x_l^{ij}, y_l^{ij}, z_l^{ij})$ как функция углов места θ и азимута φ (рис. 1), причем направление максимума ДНА ($\theta = \varphi = 0$) совпадает с направлением оси x_l^{ij} , угол θ отсчитывается в плоскости $y_l^{ij} = 0$ от оси x_l^{ij} , а угол φ отсчитывается в плоскости $z_l^{ij} = 0$ от оси x_l^{ij} . Введенная СК отличается от сферической, в которой угол θ' отсчитывается в той же плоскости, но от оси z_l^{ij} , так что $\theta' = \pi/2 - \theta$. Направляющий вектор a прямой, проходящей через начало координат в направлении (θ, φ) , равен

$$a(\theta, \varphi) = (\cos\theta \cos\varphi, \cos\theta \sin\varphi, \sin\theta)^T. \quad (1)$$

Предполагается, что плоскость поляризации каждого луча совпадает с плоскостью $z_A = 0$ или $y_A = 0$. Если же эта плоскость повернута на некоторый угол ξ_l^{ij} , то локальную СК сначала необходимо повернуть на угол $-\xi_l^{ij}$. Полагаем, что такой поворот заранее выполнен.

Антенная температура сигнала, принимаемого по ij -му каналу, без учета затухания на трассе распространения определяется выражением

$$T_{ij} = \int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} G_{ij}(\theta, \varphi) T(x'_{ij}, y'_{ij}) d\theta d\varphi, \quad i \in \overline{1, N_1}, \quad j \in \overline{1, N_2}, \quad (2)$$

где $G_{ij}(\theta, \varphi)$ – функция, описывающая ДНА по ij -му лучу; (x'_{ij}, y'_{ij}) – координаты точки пересечения плоскости $z = 0$ и прямой, проходящей через точку (x_0, y_0, z_0) в направлении вектора d^{ij} ; N_1, N_2 – размеры матрицы ТИ. Требуется найти зависимости $x'_{ij} = x'_{ij}(\theta, \varphi)$; $y'_{ij} = y'_{ij}(\theta, \varphi)$, чтобы по формуле (2) смоделировать ТИ.

Рассмотрим антенную СК (x_A, y_A, z_A) (рис. 1), в которой направление групповой ДНА совпадает с направлением оси x_A , оси строчных парциальных ДНА лежат в плоскостях, проходящих через ось y_A под углами

$$M_i = -\Delta_M \left[\frac{N_1 - 1}{2} - (i - 1) \right], \quad i \in \overline{1, N_1} \quad (3)$$

к плоскости $z_A = 0$, а оси столбцовых ДНА лежат в плоскостях, проходящих через ось z_A под углами

$$A_j = \Delta_A \left[\frac{N_2 - 1}{2} - (j - 1) \right], j \in \overline{1, N_2} \quad (4)$$

к плоскости $y_A = 0$. В формулах (3), (4)

Δ_M, Δ_A – угловой шаг между соседними плоскостями, знак «минус» в (3) выбран для того, чтобы нумерация лучей соответствовала принятой в матрицах. Уравнения указанных плоскостей имеют вид:

$$\begin{aligned} D_i: x_A \sin M_i - z_A \cos M_i &= 0; \\ L_j: x_A \sin A_j - y_A \cos A_j &= 0. \end{aligned} \quad (5)$$

Направление ij -го луча в антенной СК совпадает с направляющим вектором b^{ij} линии пересечения плоскостей D_i и L_j . Известно [1], что направляющий

вектор прямой, которая является линией пересечения плоскостей

$$A_1x + B_1y + C_1z + D_1 = 0 \quad \text{и} \quad A_2x + B_2y + C_2z + D_2 = 0,$$

определяется выражением

$$b = [B_1C_2 - B_2C_1, C_1A_2 - C_2A_1, A_1B_2 - A_2B_1]^T.$$

Следовательно, из (5) следует

$$b^{ij} = [\cos M_i \cos A_j, \cos M_i \sin A_j, \sin M_i \cos A_j]^T. \quad (6)$$

Для перехода от локальной СК к антенной необходимо осуществить поворот систем координат. Из теории вращений [1] известно, что каждое вращение можно разложить на композицию элементарных вращений вокруг осей x, y, z на соответствующие углы ξ, η, ψ , причем матрицы элементарных вращений имеют вид:

$$C_x(\xi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \xi & -\sin \xi \\ 0 & \sin \xi & \cos \xi \end{bmatrix}; \quad C_y(\xi) = \begin{bmatrix} \cos \xi & 0 & \sin \xi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \xi & 0 & \cos \xi \end{bmatrix}; \quad C_z(\xi) = \begin{bmatrix} \cos \xi & -\sin \xi & 0 \\ \sin \xi & \cos \xi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Из рис. 1 следует, что сначала необходимо осуществить поворот вокруг оси $x_{\text{л}}^{ij}$ на угол $-\xi_{\text{л}}^{ij}$, который предполагается выполненным, затем поворот вокруг оси $y_{\text{л}}^{ij}$ на угол

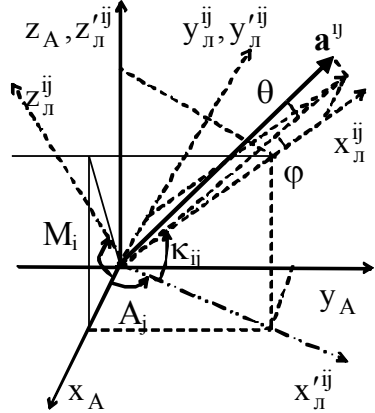


Рис. 1. Системы координат

$$\eta_{ij} = -\kappa_{ij} = -\arctg\left(\sqrt{(b_x^{ij})^2 + (b_y^{ij})^2} / b_z^{ij}\right) = -\arctg(\operatorname{tg} M_i \cos A_j), \quad (7)$$

При этом приходим к промежуточной СК $(x_l^{ij}, y_l^{ij} = y_n^{ij}, z_l^{ij})$. Затем осуществляется поворот вокруг оси $z_l^{ij} = z_A$ на угол $\psi_{ij} = -A_j$. Таким образом, вектор $a(\theta, \varphi)$ преобразуется в соответствии с выражением

$$a(\theta, \varphi) = C_{lij}^A b^{ij}(\theta, \varphi), \quad (8)$$

где $C_{lij}^A = C_x(-\xi_{ij})C_y(\eta_{ij})C_z(\psi_{ij})$. Поскольку матрица C_{lij}^A ортогональна, то для нее $(C_{lij}^A)^{-1} = (C_{lij}^A)^T$, поэтому из (8) следует

$$b^{ij}(\theta, \varphi) = C_A^{lij} a(\theta, \varphi), \quad (9)$$

где

$$C_A^{lij} = (C_{lij}^A)^T = \begin{bmatrix} \cos\eta_{ij} \cos\xi_{ij} & -\cos\psi_{ij} \sin\eta_{ij} \sin\xi_{ij} + \cos\xi_{ij} \sin\psi_{ij} & -\cos\xi_{ij} \sin\eta_{ij} \cos\psi_{ij} - \cos\xi_{ij} \sin\psi_{ij} \\ -\cos\eta_{ij} \sin\psi_{ij} & \sin\xi_{ij} \sin\eta_{ij} \sin\psi_{ij} + \cos\xi_{ij} \cos\psi_{ij} & \sin\psi_{ij} \sin\eta_{ij} \cos\xi_{ij} - \cos\psi_{ij} \sin\xi_{ij} \\ \sin\eta_{ij} & \cos\eta_{ij} \sin\xi_{ij} & \cos\eta_{ij} \cos\xi_{ij} \end{bmatrix}.$$

Введем связанную СК (x_c, y_c, z_c) таким образом, что ее центр совпадает с центром масс ЛА, ось x_c совпадает с продольной строительной осью ЛА, ось z_c ортогональна оси x_c и лежит в плоскости вертикальной симметрии ЛА, ось y_c дополняет координатный трехгранник до правой тройки [2]. Полагая, что антенная и связанная СК жестко связаны и повернуты друг относительно друга последовательно на известные углы ψ_A, η_A, ξ_A , найдем направляющий вектор в связанной системе координат

$$c^{ij}(\theta, \varphi) = C_c^A b^{ij}(\theta, \varphi) = C_c^A C_A^{lij} a(\theta, \varphi), \quad (10)$$

где

$$C_c^A = (C_z(-\psi_A)C_y(-\eta_A)C_x(-\xi_A))^T = \begin{bmatrix} \cos\eta_A \cos\xi_A & -\cos\eta_A \sin\psi_A & \sin\eta_A \\ \cos\psi_A \sin\eta_A \sin\xi_A + \cos\xi_A \sin\psi_A & -\sin\xi_A \sin\eta_A \sin\psi_A + \cos\xi_A \cos\psi_A & -\cos\eta_A \sin\xi_A \\ -\cos\xi_A \sin\eta_A \cos\psi_A + \cos\xi_A \sin\psi_A & \sin\psi_A \sin\eta_A \cos\xi_A + \cos\psi_A \sin\xi_A & \cos\eta_A \cos\xi_A \end{bmatrix}.$$

Углы ξ_A, η_A, ψ_A принято называть углами крена, тангажа и рысканья соответственно.

Рассмотрим теперь земную СК (x_3, y_3, z_3) [2], центр которой также совпадает с центром масс ЛА, ось z_3 совпадает с местной вертикалью, оси x_3, y_3 лежат в касательной к земной поверхности плоскости, причем

ось x_3 лежит в меридиональной плоскости и направлена с севера на юг, а ось y_3 направлена с запада на восток по направлению касательной к географической параллели. Полагаем, что известны последовательные углы поворота ψ_c, ξ_c, η_c земной СК относительно связанной в момент съема кадра (например, из результатов решения уравнений движения ЛА). Будем полагать, что при $\xi_c = \eta_c = \psi_c = 0$ ось x_c совпадает с осью z_3 , но направлена в противоположную сторону, а оси y_3 и y_c совпадают. Тогда для совпадения осей обеих СК необходимо в конце осуществить дополнительный поворот вокруг оси y_c на угол $\pi/2$. Следовательно, направляющий вектор в земной СК определяется выражением

$$d^{ij}(\theta, \varphi) = C_3^c c^{ij}(\theta, \varphi) = C_3^c C_c^A C_A^{nij} a(\theta, \varphi), \quad (11)$$

где матрица поворота $C_3^c = (C_z(-\psi_c) C_y(-\eta_c) C_x(-\xi_c) C_y(\pi/2))^T =$

$$= \begin{bmatrix} -\cos\psi_c \sin\eta_c \sin\xi_c + \cos\xi_c \sin\psi_c & \sin\psi_c \sin\eta_c \cos\xi_c + \cos\psi_c \sin\xi_c & \cos\eta_c \cos\xi_c \\ \sin\xi_c \sin\eta_c \cos\psi_c + \cos\xi_c \sin\psi_c & -\sin\xi_c \sin\eta_c \sin\psi_c + \cos\xi_c \cos\psi_c & -\cos\eta_c \sin\xi_c \\ -\cos\eta_c \sin\psi_c & \sin\psi_c \cos\eta_c & -\sin\eta_c \end{bmatrix}.$$

В целевой СК (x, y, z) (рис. 2) начало координат земной СК расположено в точке $P = (x_0, y_0, z_0)$, а направления осей этих СК совпадают. Уравнение прямой, проходящей через точку P в направлении вектора d^{ij} , имеет вид [1]:

$$\frac{x - x_0}{d_x^{ij}} = \frac{y - y_0}{d_y^{ij}} = \frac{z - z_0}{d_z^{ij}}. \quad (12)$$

Координаты точки пересечения плоскости $z = 0$ (земной поверхности) прямой (10) определяются выражениями:

$$\begin{aligned} x'_{ij}(\theta, \varphi) &= x_0 - z_0 \frac{d_x^{ij}(\theta, \varphi)}{d_z^{ij}(\theta, \varphi)}; \\ y'_{ij}(\theta, \varphi) &= y_0 - z_0 \frac{d_y^{ij}(\theta, \varphi)}{d_z^{ij}(\theta, \varphi)}. \end{aligned} \quad (13)$$

Таким образом, каждому направляющему вектору в локальной СК для ij -го луча, определяемого выражением (1), сопоставлена точка (x'_{ij}, y'_{ij}) на поверхности Земли, что позволяет по формуле (2) построить ТИ.

Пусть исходное распределение радиоярких температур за-

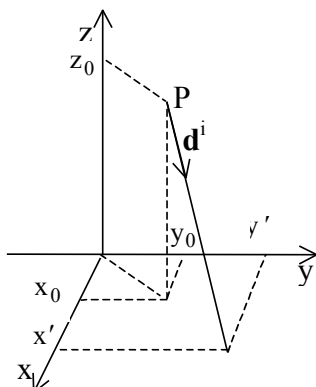


Рис. 2. Земная система координат
Рис. 2. Земная система координат

дано в виде растрового изображения, т.е. в виде матрицы $[t_{ij}]$, $i \in \overline{0, n_1 - 1}$, $j \in \overline{0, n_2 - 1}$ с известными расстояниями δx , δy между соседними пикселями в столбцах и строках соответственно. Рассмотрим матрицу как сеточную функцию в системе координат (x'', y'') , начало которой совпадает с левым верхним углом матрицы, ось x'' направлена в противоположном направлении относительно оси y СК, связанной с поверхностью Земли, а ось y'' направлена в обратном направлении по отношению оси x . Тогда координаты связаны соотношениями:

$$x = (n_1 - 1 - y'')\delta x; \quad y = (n_2 - 1 - x'')\delta y.$$

Обратное преобразование имеет вид:

$$y'' = n_1 - 1 - x/\delta x; \quad x'' = n_2 - 1 - y/\delta y. \quad (14)$$

Пусть $\{x\}$ – операция взятия ближайшего целого к числу x . Найдем ближайшую целочисленную точку в новой СК:

$$j = n_2 - 1 - \{y'/\delta y\}; \quad i = n_1 - 1 - \{x'/\delta x\}. \quad (15)$$

Тогда яркость в точке (x', y') , определяемой формулами (11), можно найти, например, с помощью интерполяции по шести ближайшим к ij -й точке элементам изображения [3]:

$$\begin{aligned} T_{ij}(x', y') \approx & q \frac{q-1}{2} t_{i-1, j} + p \frac{p-1}{2} t_{i, j-1} + (1 + pq - p^2 - q^2) \cdot t_{ij} + \\ & + p \frac{p-2q+1}{2} t_{i, j+1} + q \frac{q-2p+1}{2} t_{i+1, j} + pq t_{i+1, j+1}, \end{aligned} \quad (16)$$

$$\text{где } p = \frac{x'}{\delta x} - \left\{ \frac{x'}{\delta x} \right\}; \quad q = \frac{y'}{\delta y} - \left\{ \frac{y'}{\delta y} \right\}.$$

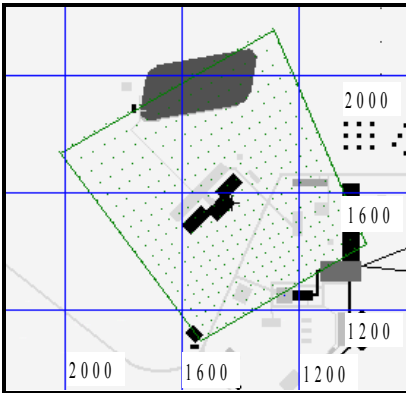


Рис. 3. Изображение объекта

Для примера рассмотрим результат моделирования ТИ по растровому изображению промышленного объекта (фрагмент – на рис. 3), имеющего размеры: $n_1 = n_2 = 500$; $\delta x = \delta y = 5 \text{ м}$. Зададимся следующей совокупностью параметров: $N_1 = N_2 = 20$; ширина ДНА в угломестной и азимутальной плоскостях $\Delta\theta = \Delta\varphi = 2^\circ$; $\Delta_A = \Delta_M = 2^\circ$; координаты центра масс ЛА $x_0 = 1250 \text{ м}$, $y_0 = 1250 \text{ м}$, $z_0 = 1000 \text{ м}$; $\psi_A = \eta_A = \xi_A = \psi_s = 0^\circ$; $\eta_s = -20^\circ$;

$\xi_s = -30^\circ$. На изображении отмечены точки пересечения осей парциальных ДНА матричной антенны с поверхностью Земли для такого набора параметров.

При гауссовской аппроксимации парциальной ДНА

$$G(\theta, \varphi) = \frac{1}{2\pi\sigma_\theta\sigma_\varphi} \exp\left(-\frac{1}{2}\left[\left(\frac{\theta}{\sigma_\theta}\right)^2 + \left(\frac{\varphi}{\sigma_\varphi}\right)^2\right]\right),$$

где

$$\sigma_\theta = \frac{\Delta\theta}{\sqrt{2\ln 2}};$$

$$\sigma_\varphi = \frac{\Delta\varphi}{\sqrt{2\ln 2}},$$

формирование ТИ осуществлялось в соответствии с выражением



Рис. 4. Текущее изображение

$$T_{ij} = \frac{1}{2\pi\sigma_\theta\sigma_\varphi} \int_{-4\sigma_\theta}^{4\sigma_\theta} \int_{-4\sigma_\varphi}^{4\sigma_\varphi} \exp\left(-\frac{1}{2}\left[\left(\frac{\theta}{\sigma_\theta}\right)^2 + \left(\frac{\varphi}{\sigma_\varphi}\right)^2\right]\right) \times T(x'_{ij}(\theta, \varphi), y'_{ij}(\theta, \varphi)) d\theta d\varphi.$$

Смоделированное ТИ в виде растрового изображения представлено на рис. 4.

Таким образом, формула (2) с учетом выражений (1), (6) – (11), (13), (15), (16) решает поставленную задачу моделирования текущего изображения на борту ЛА.

ЛИТЕРАТУРА

1. Корн Г., Корн Т. *Справочник по математике для научных работников и инженеров.* – М.: Наука, 1968. – 720 с.
2. Остославский И.В., Стражева И.В. *Динамика полета. Траектории летательных аппаратов.* – М.: Машиностроение, 1969. – 500 с.
3. Дьяконов В.П. *Справочник по расчетам на микрокалькуляторах.* – М.: Наука, 1989. – 484 с.

Поступила 18.11.2002

АНТЮФЕЕВ Валерий Иванович, доктор техн. наук, старший научный сотрудник, главный научный сотрудник ВНИИ КИ (при ХВУ). В 1969 году окончил ХГУ. Область научных интересов – системы навигации летательных аппаратов, цифровая обработка изображений.

БЫКОВ Виктор Николаевич, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, начальник НИО научного центра при ХВУ. В 1971 году окончил ХВКИУ. Область научных интересов – системы навигации летательных аппаратов, дистанционное зондирование Земли, цифровая обработка изображений.

ГРИЧАНЮК Александр Михайлович, зам. нач. НИО научного центра при ХВУ. В 1990

году окончил ХВВКИУ РВ. Область научных интересов – системы навигации летательных аппаратов, цифровая обработка изображений.

ЧЕРЕПНЁВ Аркадий Степанович, доктор техн. наук, профессор, профессор кафедры ХГТУСХ. Окончил ХВАИУ в 1955 г. Область научных интересов – моделирование радиотехнических систем, взаимодействие электромагнитных волн с биологическими объектами.
