РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ

АВТОМЕТРИЯ

2002, том 38, № 6

УДК 621.319.26

В. К. Клочко

(Рязань)

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ДОПЛЕРОВСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ РАЗРЕШЕНИЯ БОРТОВОЙ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ ТРЕХМЕРНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПОВЕРХНОСТИ

Предложены методика и алгоритм определения координат элементов разрешения импульсно-доплеровской бортовой радиолокационной системы, позволяющие повысить разрешающую способность трехмерных радиолокационных изображений земной поверхности при маловысотном полете.

Введение. В информационных системах обеспечения маловысотного полета на базе бортовых радиолокационных систем (БРЛС) [1] при получении изображения земной поверхности в моменты времени $t_0, t_1, \ldots, t_N, \ldots$ используются массивы данных $A_N(R_i, \varphi_j, \theta_k) = A_N(i, j, k)$, представляющие амплитуду отраженного сигнала в каждом i-, j-, k-м элементе разрешения (ЭР) антенны с размерами $R_i \pm \Delta R/2$, $\varphi_j \pm \Delta\varphi/2$, $\theta_k \pm \Delta\theta/2$, где R_i, φ_j, θ_k – сферические координаты центра i-, j-, k-го ЭР (дальность, азимут, угол места); $\Delta R, \Delta\varphi, \Delta\theta$ – разрешающая способность по R, φ, θ. Из-за больших угловых размеров $\Delta\varphi, \Delta\theta$ диаграммы направленности антенны (ДНА) БРЛС изображение поверхности получается размытым. В связи с этим возникает проблема получения качественных (различимых) изображений поверхности путем уменьшения угловых размеров $\Delta\varphi$ и $\Delta\theta$ ЭР.

В существующих импульсно-доплеровских БРЛС переднебокового обзора при наблюдении за поверхностью на большой дальности и большой высоте полета из-за большой величины $\Delta\theta$ высоту поверхности обычно не учитывают и первичное изображение получают в виде матрицы амплитуд $A_N(i, j)$ в системе двух координат (дальность R_i и доплеровская частота f_j (или азимут φ_j)), при этом разрешение по азимуту $\Delta\varphi$ за счет узкополосной доплеровской фильтрации уменьшается в несколько раз. Однако на малой высоте (в режиме маловысотного полета), когда информация о высоте поверхности становится существенной, такой подход неприменим. Поэтому актуальна разработка алгоритмического обеспечения маловысотного полета, в основе которого лежит описание данных первичной обработки импульсно-доплеровской БРЛС в трехмерных системах координат.

Возникает новая концепция [2] пространственно-временной обработки трехмерных радиолокационных (РЛ) изображений поверхности на основе

БРЛС с электронным сканированием, которая базируется на новой технологии получения РЛ-данных за счет электронного управления лучом и алгоритмически предполагает обработку первичной РЛ-информации, полученной с учетом доплеровской обработки и привязанной к моментам времени $t_0, t_1, \ldots$ $\ldots, t_N$ в единой прямоугольной трехмерной системе координат x, y, z с определением координат доплеровских ЭР (ДЭР). Ниже предлагаются методика расчета и алгоритм определения координат ДЭР применительно к концепции [2].

Модель доплеровского элемента разрешения и постановка задачи. В текущий момент времени t_N рассматривается самолетная прямоугольная система координат $\langle O_c, x_c, y_c, z_c \rangle$ (рис. 1). Элемент разрешения представляет пространственную фигуру, образованную пересечением конической поверхности ДНА $\varphi_0 \pm \Delta\varphi/2$, $\theta_0 \pm \Delta\theta/2$ с вершиной в точке O_c, угловыми координатами (φ_0, θ_0) линии визирования (вектора $\mathbf{a}_0$ на рис. 1) и двух сферических поверхностей постоянного уровня дальности $R_0 \pm \Delta R/2$ с центром в точке O_c. Центром данного ЭР является точка O со сферическими координатами $(R_0, \varphi_0, \theta_0)$, положительный отсчет φ и θ осуществляется против часовой стрелки относительно оси $O_c x_c$.

Наличие доплеровских узкополосных фильтров с геометрической точки зрения означает дополнительное рассечение поверхности ЭР рядом конических поверхностей постоянного уровня доплеровской скорости v_n с вершиной в точке O_c и осью симметрии, совпадающей с вектором скорости $\mathbf{v}$ движения объекта-носителя радиолокационной системы (РЛС), направленным по оси $O_c x_c$. В результате образуются более мелкие элементы разрешения в виде сложных пространственных областей ДЭР разных размеров и с различной ориентацией в пространстве.

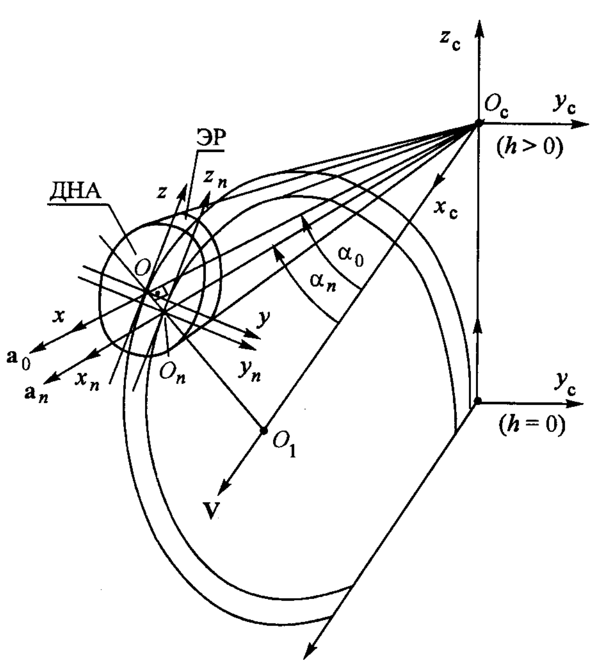

Рис. 1

Задача состоит в определении сферических координат ДЭР с последующим их пересчетом в единую прямоугольную систему координат, что позволяет реализовать методы пространственно-временной обработки трехмерных РЛ-изображений [2] по совокупности всех ДЭР, полученных в моменты $t_0, t_1, \ldots, t_N, \ldots$.

Принципиальное решение задачи может быть получено следующим образом. Обозначим α_n угол между осью $O_c x_c$ (вектором $\mathbf{v}$) и образующей $O_c O_n$ (вектором $\mathbf{a}_n$) n-го конуса постоянной доплеровской скорости v_n (см. рис. 1).

Связь α_n с угловыми координатами (φ_n, θ_n) вектора $\mathbf{a}_n$ устанавливается по формуле

$$\cos\alpha_n = \cos\varphi_n \cdot \cos\theta_n, \tag{1}$$

где $\cos\alpha_n$ находится через скалярное произведение орта $\mathbf{i}_c$ оси $O_c x_c$ и орта $\mathbf{a}_n$ оси $O_c O_n$. Действительно, координаты вектора $\mathbf{a}_n$, имеющие в местной прямоугольной системе $\langle O_n, x_n, y_n, z_n\rangle$ n-го ДЭР канонический вид $(1, 0, 0)$, в самолетной системе $\langle O_c, x_c, y_c, z_c\rangle$ находятся по формуле связи старых и новых координат при преобразовании типа поворота на угол φ_n вокруг оси $O_c z_c$ и затем поворота на угол θ_n вокруг оси $O_c y'_c$:

$$\begin{pmatrix} \cos\varphi_n & -\sin\varphi_n & 0 \\ \sin\varphi_n & \cos\varphi_n & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} \cos\theta_n & 0 & -\sin\theta_n \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta_n & 0 & \cos\theta_n \end{pmatrix}\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\varphi_n \cdot \cos\theta_n \\ \sin\varphi_n \cdot \cos\theta_n \\ \sin\theta_n \end{pmatrix},$$

что равносильно повороту $\mathbf{i}_c = (1, 0, 0)$ на угол φ_n вокруг оси $O_c z_c$ в плоскости $O_c x_c y_c$ и затем повороту на угол θ_n вокруг оси $O_c y'_c$ в плоскости $O_c x'_c z_c$. В результате получается вектор

$$\mathbf{a}_n = (\cos\varphi_n \cdot \cos\theta_n,\ \sin\varphi_n \cdot \cos\theta_n,\ \sin\theta_n),$$

причем $|\mathbf{a}_n| = 1$. Тогда

$$\cos\alpha_n = \mathbf{i}_c \cdot \mathbf{a}_n = \cos\varphi_n \cdot \cos\theta_n.$$

Использование формулы (1) при определении координат n-го ДЭР данного элемента разрешения сводится к численному решению нелинейного уравнения для каждого значения доплеровского угла

$$\alpha \in [\alpha_n - \Delta\alpha_n/2,\ \alpha_n + \Delta\alpha_n/2],$$

где α_n – доплеровский угол, соответствующий доплеровской частоте f_n и центру n-го ДЭР, при ограничениях

$$\varphi_n \in [\varphi_0 - \Delta\varphi/2, \varphi_0 + \Delta\varphi/2], \qquad \theta_n \in [\theta_0 - \Delta\theta/2, \theta_0 + \Delta\theta/2].$$

Разрешение по углу $\Delta\alpha_n$ соответствует разрешению по скорости Δv (ширине Δf полосы частот узкополосного доплеровского фильтра) и связано с α_n нелинейной зависимостью

$$\Delta v = 2v\sin\alpha_n \cdot \sin\Delta\alpha_n, \qquad \alpha_n \in [0, \pi/2],$$

при фиксированных значениях v и Δv.

Для работы в реальном масштабе времени требуется более простое описание ДЭР в виде линейных зависимостей. Далее предлагается методика определения таких зависимостей, основанная на аппроксимации конических и сферических поверхностей цилиндрическими и плоскими, допустимая в пределах ЭР.

Линейная модель доплеровского элемента разрешения. Описание ДЭР в виде линейных зависимостей получается следующим образом.

1. Рассматривается данный ЭР с центральной точкой O, которая имеет сферические $(R_0, \varphi_0, \theta_0)$ и прямоугольные (x_0, y_0, z_0) координаты. Через точку O проводится касательная плоскость к сферической поверхности $R = \text{const}$, которая пересекает ось $O_c x_c$ в точке $O_1(x_1, 0, 0)$. Координата x_1 находится из условия ортогональности векторов $\mathbf{O_cO} = (x_0, y_0, z_0)$ и $\mathbf{O_1O} = (x_0 - x_1, y_0, z_0)$ через скалярное произведение:

$$\mathbf{O_cO} \cdot \mathbf{O_1O} = 0 \Rightarrow x_1 = (x_0^2 + y_0^2 + z_0^2)/x_0 = R_0^2/x_0. \tag{2}$$

2. Задается доплеровский угол $\alpha = \alpha_n$ центра n-го ДЭР, рассматриваемого в составе данного ЭР. Коническая поверхность $\alpha_n = \text{const}$ в пределах ЭР может рассматриваться как цилиндрическая, которая пересекает касательную плоскость по линии окружности с центром в точке O_1 (рис. 2). Через точку $C = O_n$ пересечения данной окружности с отрезком O_1O проводится касательная прямая, представляющая центральную продольную ось n-го ДЭР и пересекающая ЭР в точках A и B. Считается (для круговой ДНА), что отрезок AB любого n-го ДЭР в составе данного ЭР составляет с осью Oy угол β, который отсчитывается в положительном направлении против часовой стрелки.

3. Угловой коэффициент b продольной оси ДЭР (отрезка AB) определяется формулой

$$b = \operatorname{tg}\beta = \pm|\operatorname{tg}\varphi_0|(1 + \operatorname{ctg}^2\theta_0)^{1/2}, \tag{3}$$

где φ_0 и θ_0 – угловые координаты точки O; $\varphi_0, \theta_0 \in (-\pi/2, \pi/2), \theta_0 \neq 0$.

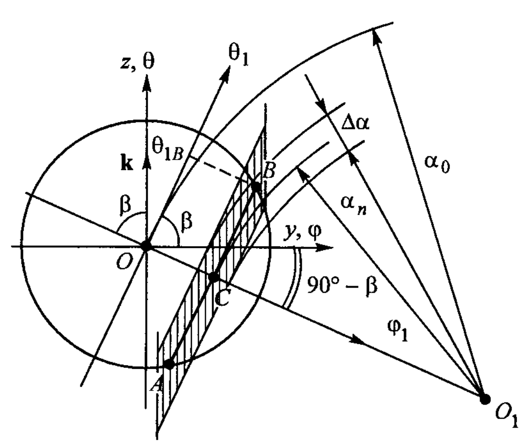

Рис. 2

Расчет формулы (3) основан на определении косинуса угла β между вектором $\mathbf{O_1O}$ и ортом $\mathbf{k}$ оси Oz, который совпадает с углом β наклона AB к оси Oy (см. рис. 2). Координаты вектора $\mathbf{k}$ в системе $\langle O_c, x_c, y_c, z_c\rangle$ находятся с помощью преобразований, аналогичных преобразованиям при выводе формулы (1):

$$\begin{pmatrix} \cos\varphi_0 & -\sin\varphi_0 & 0 \\ \sin\varphi_0 & \cos\varphi_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\theta_0 & 0 & -\sin\theta_0 \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta_0 & 0 & \cos\theta_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\cos\varphi_0 \cdot \sin\theta_0 \\ -\sin\varphi_0 \cdot \sin\theta_0 \\ \cos\theta_0 \end{pmatrix},$$

что равносильно повороту осей $O_c x_c$ и $O_c y_c$ на угол φ_0 вокруг оси $O_c z_c$ и затем повороту осей $O_c x'_c$ и $O_c z_c$ на угол θ_0 вокруг оси $O_c y'_c$. В результате получается вектор

$$\mathbf{k} = (-\cos\varphi_0 \cdot \sin\theta_0,\ -\sin\varphi_0 \cdot \sin\theta_0,\ \cos\theta_0),$$

причем $|\mathbf{k}| = 1$.

Вектор $\mathbf{O_1O}$ определяется с учетом (2):

$$\mathbf{O_1O} = (x - x_1, y, z) = (x - (x^2 + y^2 + z^2)/x, y, z) = (-(y^2 + z^2)/x, y, z),$$

причем

$$|\mathbf{O_1O}| = ((y^2 + z^2)^2/x^2 + y^2 + z^2)^{1/2} = R_0((y/x)^2 + (z/x)^2)^{1/2},$$

где $R_0 = (x^2 + y^2 + z^2)^{1/2}$, $x = x_0, y = y_0, z = z_0$.

С учетом связи $x = R\cos\theta \cdot \cos\varphi$, $y = R\cos\theta \cdot \sin\varphi$, $z = R\sin\theta$ скалярное произведение $\mathbf{O_1O} \cdot \mathbf{k}$ и длина вектора $\mathbf{O_1O}$ находятся следующим образом:

$$\mathbf{O_1O} \cdot \mathbf{k} = (y^2 + z^2)\cos\varphi \cdot \sin\theta/x - y\sin\varphi \cdot \sin\theta + z\cos\theta =$$

$$= R(\sin^2\theta/\cos\theta + \sin\theta \cdot \cos\theta) = R\,\mathrm{tg}\,\theta,$$

$$|\mathbf{O_1O}| = R(\mathrm{tg}^2\varphi + \mathrm{tg}^2\theta/\cos^2\varphi)^{1/2} = R(\sin^2\varphi + \mathrm{tg}^2\theta)^{1/2}/|\cos\varphi|,$$

где $R = R_0$, $\varphi = \varphi_0$, $\theta = \theta_0$. Тогда

$$\cos\beta = |\cos\varphi|\,\mathrm{tg}\,\theta/(\sin^2\varphi + \mathrm{tg}^2\theta)^{1/2} = \pm|\cos\varphi|/(1 + \sin^2\varphi \cdot \mathrm{ctg}^2\theta)^{1/2},$$

$$b = \mathrm{tg}\,\beta = \pm((1 - \cos^2\beta)/\cos^2\beta)^{1/2} = \pm(\sin^2\varphi\,(1 + \mathrm{tg}^2\theta)/(\mathrm{tg}^2\theta \cdot \cos^2\varphi))^{1/2} =$$

$$= \pm|\mathrm{tg}\,\varphi|(1 + \mathrm{ctg}^2\theta)^{1/2}, \quad \varphi = \varphi_0, \quad \theta = \theta_0 \neq 0. \tag{4}$$

Знак b определяется знаками φ_0 и θ_0: если φ_0 и θ_0 имеют разные знаки, то b положителен, если одинаковые – отрицателен. Если принять положительный отсчет φ и θ по часовой стрелке, то формула для углового коэффициента примет вид

$$b = \operatorname{tg}\varphi_0 (1 + \operatorname{tg}^2\theta_0)^{1/2} / \operatorname{tg}\theta_0. \qquad (5)$$

Формулы (3)–(5) не зависят от дальности R и позволяют выполнить расчеты заранее для различных значений φ_0 и θ_0.

4. Для круговой ($\Delta\varphi = \Delta\theta$) ДНА в местной угловой системе координат $\langle O, \varphi, \theta \rangle$ данного ЭР (см. рис. 2) угловые координаты φ_{0C} и θ_{0C} центральной точки C продольной оси AB, соответствующей заданному доплеровскому углу α_n, находятся по формулам

$$\varphi_{0C} = (\alpha_0 - \alpha_n)\cos(90° - \beta) = (\alpha_0 - \alpha_n)\sin\beta,$$

$$\theta_{0C} = -(\alpha_0 - \alpha_n)\sin(90° - \beta) = (\alpha_n - \alpha_0)\cos\beta \quad \text{при} \quad \theta_0 < 0$$

или

$$\varphi_{0C} = (\alpha_n - \alpha_0)\sin\beta, \qquad \theta_{0C} = (\alpha_0 - \alpha_n)\cos\beta \quad \text{при} \quad \theta_0 > 0,$$

где α_0 – доплеровский угол, соответствующий точке O и вычисляемый по формуле

$$\alpha_0 = \arccos(\cos\varphi_0 \cdot \cos\theta_0); \qquad (6)$$

$\cos\beta$ определен формулой (4); $\sin\beta = \pm(1 - \cos^2\beta)^{1/2}$; знак β совпадает со знаком углового коэффициента b (положительный отсчет β против часовой стрелки); определение $\alpha = \alpha_n$ дается далее в описании алгоритма определения координат ДЭР.

В самолетной угловой системе координаты точки C определяются следующим образом:

$$\varphi_C = \varphi_0 \pm (\alpha_0 - \alpha_n)\sin\beta, \qquad \theta_C = \theta_0 \pm (\alpha_n - \alpha_0)\cos\beta. \qquad (7)$$

5. Для нахождения угловых координат точек A и B, расположенных на концах продольной оси ДЭР, рассматриваются две системы координат: $\langle O, \varphi, \theta \rangle$ и $\langle O, \varphi_1, \theta_1 \rangle$, повернутые одна относительно другой на угол $(90° - \beta)$ (см. рис. 2). В системе $\langle O, \varphi_1, \theta_1 \rangle$ угловые координаты точки B определяются из уравнения окружности с угловым радиусом $\Delta\varphi/2$, который задается угловым размером круговой ДНА:

$$\varphi_{1B} = \alpha_0 - \alpha_n, \qquad \theta_{1B} = ((\Delta\varphi/2)^2 - \varphi_{1B}^2)^{1/2}.$$

В местной угловой системе $\langle O, \varphi, \theta \rangle$

$$\varphi_{0B} = \varphi_{1B}\cos(90° - \beta) + \theta_{1B}\sin(90° - \beta) = \varphi_{0C} + \theta_{1B}\cos\beta.$$

Координаты точки A находятся из условия симметрии

$$\varphi_{0A} = \varphi_{0C} - \theta_{1B}\cos\beta.$$

В самолетной угловой системе координат имеем

$$\varphi_A = \varphi_C \mp ((\Delta\varphi/2)^2 - (\alpha_0 - \alpha_n)^2)^{1/2}\cos\beta,$$
$$\varphi_B = \varphi_C \pm ((\Delta\varphi/2)^2 - (\alpha_0 - \alpha_n)^2)^{1/2}\cos\beta. \quad (8)$$

Таким образом, каждый *n*-й угломерный ДЭР в составе рассматриваемого угломерного ЭР описывается как область $\{(\varphi, \theta)\}_n$ следующей системой:

$$\varphi_A - \Delta_1\varphi \le \varphi \le \varphi_B + \Delta_1\varphi, \qquad \theta(\varphi) - \Delta_1\theta \le \theta \le \theta(\varphi) + \Delta_1\theta,$$
$$\Delta_1\varphi = (\Delta\alpha_n/2)\sin\beta, \qquad \Delta_1\theta = (\Delta\alpha_n/2)\cos\beta, \quad (9)$$

где зависимость $\theta(\varphi)$ задается линейным уравнением центральной продольной оси ДЭР:

$$\theta(\varphi) = \theta_C + b(\varphi - \varphi_C). \quad (10)$$

6. Практически угловые размеры всех ДЭР в составе данного ЭР удобно принять одинаковыми, а расчет проводить только для одного центрального ДЭР при $\alpha_n = \alpha_0$, тогда

$$\varphi_A = \varphi_C \mp (\Delta\varphi/2)\cos\beta, \qquad \varphi_B = \varphi_C \pm (\Delta\varphi/2)\cos\beta.$$

В случае веерной ДНА ($\Delta\theta \gg \Delta\varphi$), которую целесообразно применять при малых значениях коэффициента b, расчет φ_A, φ_B и φ_C упрощается:

$$\varphi_A = \varphi_C - \Delta\varphi/2, \qquad \varphi_B = \varphi_C + \Delta\varphi/2, \qquad \varphi_C = \varphi_0.$$

Расчет θ_C и зависимости $\theta(\varphi)$ осуществляется аналогично (7) и (10).

Алгоритм определения координат доплеровского элемента разрешения. 1. Для каждого *J*-, *K*-го элемента разрешения по углам φ и θ, заданного в сферических координатах в виде угломерной области

$$G_0 = \{(\varphi, \theta)\}_{JK} = \{(\varphi_0, \theta_0), (\Delta\varphi, \Delta\theta)\}$$

с центром (φ_0, θ_0) и размерами $\Delta\varphi, \Delta\theta$, определяется доплеровский угол α_0, соответствующий центру ЭР, по формуле (6).

2. Находится диапазон $[\alpha_{\min}, \alpha_{\max}]_{JK}$ значений доплеровского угла α, соответствующий данному ЭР, где в случае круговой (точечной) ДНА $\alpha_{\min} = \alpha_0 - \Delta\varphi/2$, $\alpha_{\max} = \alpha_0 + \Delta\varphi/2$, и устанавливается соответствие

$$[\alpha_{\min}, \alpha_{\max}]_{JK} \sim [f_{\min}, f_{\max}]_{JK}$$

с полосой доплеровских частот, так что каждому *L*-му угловому промежутку $[\alpha_L, \alpha_{L+1}] \subset [\alpha_{\min}, \alpha_{\max}]$ доплеровского элемента разрешения $D_0 = D_0(J, K, L) \subset G_0$ соответствует полоса частот $[f_L, f_{L+1}] \subset [f_{\min}, f_{\max}]$ доплеровского фильтра.

3. Для каждого *L*-го ДЭР определяются доплеровский угол $\alpha = (\alpha_L + \alpha_{L+1})/2$, разрешение по углу $\Delta\alpha = \alpha_{L+1} - \alpha_L$ и вычисляются угло-

вые сферические координаты центра φ_C и краевых точек φ_A, φ_B ДЭР по формулам (7), (8), (4):

$$\varphi_C = \varphi_0 \pm (\alpha_0 - \alpha)\sin\beta,$$

$$\varphi_A = \varphi_C \mp ((\Delta\varphi/2)^2 - (\alpha_0 - \alpha)^2)^{1/2}\cos\beta,$$

$$\varphi_B = \varphi_C \pm ((\Delta\varphi/2)^2 - (\alpha_0 - \alpha)^2)^{1/2}\cos\beta,$$

$$\cos\beta = \pm|\cos\varphi_0|(1+\sin^2\varphi_0 \cdot \mathrm{ctg}^2\theta_0)^{1/2},$$

где знаки определяются взаимным положением векторов $\mathbf{v}$ и $\mathbf{a}_0$.

4. Каждый J-, K-, L-й угломерный ДЭР $D_0 = \{(\varphi, \theta, \alpha)\}_{JKL}$ описывается в угловых сферических координатах φ и θ по формулам (9), (10), (3) или (5):

$$\varphi_A - \Delta_1\varphi \le \varphi \le \varphi_B + \Delta_1\varphi, \qquad \theta(\varphi) - \Delta_1\theta \le \theta \le \theta(\varphi) + \Delta_1\theta,$$

где

$$\Delta_1\varphi = (\Delta\alpha/2)\sin\beta, \qquad \Delta_1\theta = (\Delta\alpha/2)\cos\beta, \qquad \theta(\varphi) = \theta_C + b(\varphi - \varphi_C),$$

$$\theta_C = \theta_0 \pm (\alpha - \alpha_0)\cos\beta, \qquad b = \pm|\mathrm{tg}\varphi_0|(1+\mathrm{ctg}^2\theta_0)^{1/2}.$$

Расчеты не зависят от дальности R и выполняются заранее для различных значений φ_0 и θ_0, которые определяются режимом наблюдения РЛС. Практически описание D_0 сводится к запоминанию системы чисел $(\varphi_C, \Delta_2\varphi, \theta_1, \theta_2, b, \alpha)_{JKL}$, где

$$\Delta_2\varphi = ((\Delta\varphi/2)^2 - (\alpha_0 - \alpha)^2)^{1/2}\cos\beta + \Delta_1\varphi,$$

$$\theta_1 = \theta_C - b\varphi_C - \Delta_1\theta, \qquad \theta_2 = \theta_C - b\varphi_C + \Delta_2\theta.$$

Тогда

$$D_0 = D_0(J, K, L) =$$

$$= \{(\varphi, \theta)\colon \varphi_C - \Delta_2\varphi \le \varphi \le \varphi_C + \Delta_2\varphi,\ \theta_1 + b\varphi \le \theta \le \theta_2 + b\varphi\}_{JKL}.$$

5. После квантования дальности R на промежутке $[R_{\min}, R_{\max}]$ с шагом ΔR ДЭР принимает окончательный вид:

$$D = D(I, J, K, L) = \{(R, \varphi, \theta)\colon R_I - \Delta R/2 \le R \le R_I + \Delta R/2,$$

$$\varphi_C - \Delta_2\varphi \le \varphi \le \varphi_C + \Delta_2\varphi,\ \theta_1 + b\varphi \le \theta \le \theta_2 + b\varphi\}_{IJKL} \subset D_0$$

и описывается системой чисел $(R, \varphi_C, \Delta_2\varphi, \theta_1, \theta_2, b, \alpha)_{IJKL}$.

Каждой области D ставится в соответствие амплитуда $A = A(D) = A(I, J, K, L)$ сигнала, полученного в I-м промежутке дальности $[R_I, R_{I+1}]$ при J-, K-м положении антенны и в L-м диапазоне частот $[f_L, f_{L+1}]$.

6. Для динамических систем обработки РЛ-информации о поверхности во времени [1, 2] осуществляется пересчет амплитуд $A = A(D) = A(R, \varphi, \theta)$ в единую прямоугольную систему координат $A = A(z, y, z)$, $z = h(x, y)$, путем

создания прямоугольной сетки с шагом дискретизации Δx, Δy, Δz и присвоения элементу дискретизации (i, j, k) амплитуды $A(D)$ той области D, в которой он оказывается. Проверка принадлежности $(x, y, z) \in D$ осуществляется проверкой выполнения системы неравенств $R_I - \Delta R/2 \le R \le R_I + \Delta R/2$, $\varphi_C - \Delta_2\varphi \le \varphi \le \varphi_C + \Delta_2\varphi$, $\theta_1 + b\varphi \le \theta \le \theta_2 + b\varphi$ для сферических координат R, φ, θ точки (x, y, z). Для уменьшения размерности максимальное значение координаты z запоминается в функции x и y как первичная оценка высоты: $z = h(x, y)$. В результате по всем i-, j-м элементам дискретизации формируются матрицы амплитуд $A(i, j)$ и высот $H(i, j)$. Последовательность первичных изображений поверхности в виде матриц $A_N(i, j)$, $H_N(i, j)$ с привязкой к дискретным моментам времени обзора t_N, $N = 0, 1, 2, \ldots$, подается на вход алгоритмов вторичной обработки РЛ-информации.

Заключение. Предложенная методика и алгоритм определения координат доплеровских элементов разрешения по данным первичной обработки БРЛС дают описание ДЭР в сферической и трехмерной прямоугольной системах координат для произвольного положения движущегося объекта-носителя РЛС. Такая методика по сравнению с существующими подходами позволяет использовать доплеровскую информацию для улучшения разрешения не только по азимуту φ, но и по углу места θ, что способствует повышению в несколько раз точности определения высоты поверхности в БРЛС переднебокового обзора (при определенном взаимном положении векторов $\mathbf{v}$ и $\mathbf{a}_0$), а также улучшению качества изображения поверхности за счет уменьшения угловых размеров элементов разрешения антенны при маловысотном полете.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Клочко В. К., Ермаков А. А.** Алгоритмы фильтрации и сегментации трехмерных радиолокационных изображений поверхности // Автометрия. 2002. **38**, № 4. С. 41.
2. **Клочко В. К., Мойбенко В. И.** Концепция пространственно-временной обработки радиолокационных изображений поверхности на базе бортовых РЛС с электронным сканированием // Радиопромышленность. 2001. № 3. С. 10.

Рязанская государственная радиотехническая академия,
E-mail: VM@RGRTA.RYAZAN.RU

Поступила в редакцию
26 июля 2001 г.