

УДК 621.319

## ФОРМИРОВАНИЕ ТРЕХМЕРНОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ БОРТОВЫМ РАДИОТЕПЛОЛОКАТОРОМ

В. К. Клочко

*Рязанский государственный радиотехнический университет  
390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1  
E-mail: KlochkoVK@mail.ru*

Предложены методы формирования трехмерного изображения поверхности и объектов на поверхности с помощью бортовой многоканальной радиотеплолокационной станции, основанные на измерении дальности, восстановлении изображений и корреляционно-экстремальном совмещении кадров.

*Ключевые слова:* радиотеплолокация, радиотепловое изображение, разрешающая способность.

**Введение.** В пассивном радиовидении на базе бортовых радиотеплолокационных станций (РТЛС) миллиметрового диапазона возникает необходимость получения радиотепловых изображений (РТИ) поверхности, а также неподвижных объектов на поверхности. Исследования, проведенные в этом направлении (например, в работе [1]) свидетельствуют о том, что перспектива развития пассивного радиовидения связана с внедрением многоканальных систем с антенными решетками [2]. На этой технической основе может быть решена и актуальная проблема формирования трехмерных РТИ в режиме облета носителем РТЛС контролируемого участка поверхности.

Цель данной работы — создание методов формирования трехмерного РТИ поверхности и объектов на поверхности с помощью бортовой многоканальной РТЛС, основанных на измерении дальности до элементов дискретизации поверхности, восстановлении амплитудного РТИ поверхности и корреляционно-экстремальном совмещении кадров РТИ.

**Модель измерений и математическая постановка задачи.** При использовании многоканальной антенной системы в виде решетки из  $Q$  расположенных определенным образом элементов приемный сигнал  $S(t)$  попадает одновременно в  $q$ -е приемные каналы ( $q = \overline{1, Q}$ ) и подвергается в них узкополосной фильтрации. В результате спектральной обработки в каждом  $q$ -м канале в дискретный  $\mu$ -й момент времени  $t_\mu$ ,  $\mu = \overline{1, L}$ , выделяется комплексная амплитуда сигнала  $\dot{s}_q(t) = U(t) e^{i\Phi_q(t)}$  с амплитудой  $U(t)$ , которая характеризует интенсивность поля излучения по ширине диаграммы направленности (ДН)  $q$ -го приемного элемента антенны (на уровне 0,5 мощности), и фазой  $\Phi_q(t)$ , которая включает в себя детерминированную составляющую, зависящую от расположения  $q$ -го элемента в антенне, и аддитивную случайную составляющую. В области совместного действия всех  $q$ -х ДН справедлива следующая дискретная модель измерений:

$$\dot{s}_q(t) = \sum_{i=-m}^m \sum_{j=-n}^n \dot{g}_q(i, j) \dot{u}(t, i, j) + \dot{p}_q(t), \quad q = \overline{1, Q}, \quad (1)$$

где суммирование ведется от центра антенны по  $i, j$ -м элементам дискретизации угла места ( $i = \overline{-m, m}$ ) и азимута ( $j = \overline{-n, n}$ ) угломерной области размером  $M \times N = (2m + 1) \times (2n + 1)$  в системе координат носителя РТЛС;  $\dot{g}_q(i, j) = a_q(i, j) e^{i\Phi_q(i, j)}$  — нормированные комплексные коэффициенты ДН  $q$ -го канала, известные фазы  $\Phi_q(i, j)$  которых

описывают свойство приемных элементов и включают в себя известный фазовый сдвиг (запаздывание) при приеме отраженного сигнала с  $i, j$ -го углового направления  $q$ -м приемным элементом по отношению к фазовому центру антенны; множитель  $i$  в показателе степени обозначает мнимую единицу;  $\dot{u}_q(t, i, j) = U(t, i, j) e^{-i\varphi(t, i, j)}$  — полезная  $i, j$ -я составляющая сигнала  $\dot{s}_q(t)$  с амплитудой  $U(t, i, j)$ , несущей информацию о поле излучения в  $i, j$ -м элементе дискретизации, и случайной фазой  $\psi(u, i, j)$ , равномерно распределенной на отрезке  $[0, 2\pi]$ ;  $\dot{p}_q(t) = \xi_q(t) + i\eta_q(t)$  — нормальная комплексная помеха:  $\xi, \eta \in N(0, \sigma_P^2)$ .

В векторно-матричной форме модель измерений (1) принимает вид

$$\mathbf{S} = G\mathbf{U} + \mathbf{P}, \quad (2)$$

где  $\mathbf{S}$  — вектор-столбец  $Q$  комплексных измерений (1)  $\dot{s}_q(t)$ , взятых по совокупности  $q$  ( $q = \overline{1, Q}$ );  $G$  —  $Q \times MN$ -матрица комплексных коэффициентов ДН  $\dot{g}_q(i, j)$ ;  $\mathbf{U}$  —  $MN$ -вектор-столбец искоемых комплексных параметров поля излучения  $\dot{u}(t_k, i, j)$ , свернутых построчно в  $\mathbf{U}$ ;  $\mathbf{P}$  — вектор-столбец  $Q$  помех  $\dot{p}_q(t)$ .

Если коэффициенты ДН  $\dot{g}_q(i, j)$  в (1) описываются функцией с разделенными переменными  $\dot{g}_q(i, j) = \dot{g}_{q1}(i)g_{q2}(j)$ , то модель измерений для матричной антенной решетки с приемными  $q, k$ -ми элементами ( $q = \overline{1, Q}, k = \overline{1, K}$ ) представляется в матричной форме:

$$S = G_1UG_2 + P, \quad (3)$$

где  $S$  —  $Q \times K$ -матрица измерений  $\dot{s}_{qk}(t)$ , расположенных в  $q$ -х строках и  $k$ -х столбцах;  $G_1$  —  $Q \times M$ -матрица коэффициентов ДН  $\dot{g}_{q1}(i)$ ;  $U$  —  $M \times N$ -матрица искоемых комплексных амплитуд поля излучения  $\dot{u}(t, i, j)$ ;  $G_2$  —  $N \times K$ -матрица коэффициентов ДН  $\dot{g}_k(j)$ ;  $P$  —  $Q \times K$ -матрица помех  $\dot{p}_{qk}(t)$ .

Носитель РТЛС находится в самолетной прямоугольной системе координат, центр которой совмещен с центром носителя, ось  $OY$  совпадает с вектором скорости  $\mathbf{v}$  движения носителя, а ось  $OX$  расположена в плоскости правого крыла. Антенна в момент времени  $t_1$  находится в прямоугольной системе координат  $O_1X_1Y_1Z_1$ , а в момент  $t_2$  — в системе координат  $O_2X_2Y_2Z_2$ , которые расположены определенным образом относительно самолетной системы. Оси  $O_1Z_1$  и  $O_2Z_2$  совпадают с осью антенны (на рис. 1 показана четвертая часть антенны). Так как между самолетной и антенной системами существует известная связь, то ограничимся рассмотрением одной антенной системы во времени  $t$ . При движении объекта-носителя РТЛС на промежутке  $[t_1, t_2]$  осуществляется поворот осей  $O_1X_1$ ,  $O_1Y_1$  и  $O_1Z_1$  на углы  $\alpha, \beta, \gamma$  (тангаж, крен, курс), а точка  $O_1$  получает приращения параллельного переноса  $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ .

**Метод измерения дальности РТЛС.** Пусть в момент времени  $t_1$  из точки  $O_1$  в сторону точки  $A$ , расположенной на поверхности (см. рис. 1), направлен  $i, j$ -й луч, положение которого определяется углом места  $\theta_i$  и азимутом  $\varphi_j$ , обозначенные через  $\theta_1$  и  $\varphi_1$ . По этому лучу в направлении антенны идет  $i, j$ -я составляющая  $\dot{u}(t, i, j)$  излучаемого сигнала. Строится единичный вектор  $\mathbf{a}_1$  — орт вектора  $\mathbf{O}_1\mathbf{A}$ , направленный по лучу к точке  $A$ . Его координаты записываются в прямоугольной системе  $O_1X_1Y_1Z_1$ :

$$\mathbf{a}_1 = (x_1, y_1, z_1) = (\cos \theta_1 \cdot \sin \varphi_1, \sin \theta_1, \cos \theta_1 \cdot \cos \varphi_1). \quad (4)$$

Пересчитываются координаты вектора  $\mathbf{a}_1$  в систему координат  $O_2X_2Y_2Z_2$  в соответствии с формулами поворота осей и параллельного переноса:

$$\begin{bmatrix} x'_2 \\ y'_2 \\ z'_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma & 0 \\ -\sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 - \Delta x \\ y_1 - \Delta y \\ z_1 - \Delta z \end{bmatrix}, \quad (5)$$

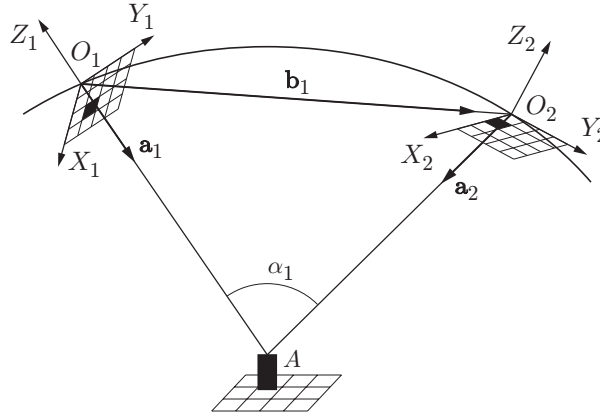


Рис. 1

где для свободных векторов приращения параллельного переноса равны нулю:  $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 0$ . Получаем вектор  $\mathbf{a}'_1 = (x'_2, y'_2, z'_2)$ .

В текущий момент  $t_2$  в системе координат  $O_2X_2Y_2Z_2$  строится вектор  $\mathbf{a}_2$  — орт вектора  $\mathbf{O}_2\mathbf{A}$ , направленный к той же точке  $A$  на поверхности:

$$\mathbf{a}_2 = (x_2, y_2, z_2) = (\cos \theta_2 \cdot \sin \varphi_2, \sin \theta_2, \cos \theta_2 \cdot \cos \varphi_2). \quad (6)$$

В системе координат  $O_2X_2Y_2Z_2$  рассматриваются три вектора:  $\mathbf{a}'_1$ ,  $\mathbf{a}_2$  и вектор параллельного переноса  $\mathbf{b}_1 = \mathbf{O}_1\mathbf{O}_2 = (-\Delta x, -\Delta y, -\Delta z)$ . Если измерения координат векторов выполнены без ошибок, то эти векторы оказываются в одной плоскости и на них строится треугольник  $AO_1O_2$ , стороны которого  $O_1A$  и  $O_2A$  равны дальностям  $R_1$  и  $R_2$  до точки  $A$ .

С помощью скалярного произведения находятся косинусы внутренних углов треугольника  $\alpha_1, \beta_1, \gamma_1$  ( $\gamma_1 = \pi - \alpha_1 - \beta_1$ ), и по теореме синусов определяются следующие дальности:

$$\cos \alpha_1 = \frac{|(\mathbf{a}'_1, \mathbf{a}_2)|}{|\mathbf{a}'_1| |\mathbf{a}_2|}, \quad \cos \beta_1 = \frac{|(\mathbf{b}_1, \mathbf{a}'_1)|}{|\mathbf{b}_1| |\mathbf{a}'_1|}, \quad \frac{|\mathbf{b}_1|}{\sin \alpha_1} = \frac{R_2}{\sin \beta_1} = \frac{R_1}{\sin (\alpha_1 + \beta_1)}, \quad (7)$$

$$R_2 = |\mathbf{b}_1| \frac{\sin \beta_1}{\sin \alpha_1}, \quad R_1 = |\mathbf{b}_1| \frac{\sin (\alpha_1 + \beta_1)}{\sin \alpha_1}.$$

Такие расчеты повторяются для нескольких моментов времени  $t_1, t_2, \dots, t_L$  при наблюдении точки  $A$  из разных положений носителя РТЛС. В результате определяется последовательность измерений дальности  $R_1, R_2, \dots, R_L$ . Так как реальные измерения углов поворота и координат векторов содержат ошибки, то с целью сглаживания этих ошибок найденные оценки дальности усредняются на момент времени  $t_L$ :  $\tilde{R}_L = \frac{1}{L} \sum_{\mu=1}^L R_\mu$ . При малых значениях  $\alpha_1$  решение (7) может быть неустойчивым, поэтому оценивание дальности следует производить при достаточно больших перемещениях носителя  $|\mathbf{b}_1|$ .

Если высота наблюдателя  $H_\mu$  определяется навигационной системой в текущий момент  $t_\mu$  и известен вектор нормали к поверхности  $\mathbf{n}_\mu$ , то дальность  $R_\mu$  можно найти с помощью модуля скалярного произведения векторов  $\mathbf{a}_\mu$  и  $\mathbf{n}_\mu$  по формуле  $R_\mu = H_\mu / |(\mathbf{a}_\mu, \mathbf{n}_\mu)|$ , а для уменьшения влияния ошибок навигационных измерений усреднить  $R_\mu$  по  $\mu$ .

В вычислительном плане возможны некоторые упрощения. Для малых углов  $\varphi_1, \theta_1$  (в пределах ДН) векторы (4), (6) можно определить приближенно:

$$\mathbf{a}_1 = (\varphi_1, \theta_1, 1), \quad \mathbf{a}_2 = (\varphi_2, \theta_2, 1). \quad (8)$$

При малых углах поворота упрощается формула (5):

$$\begin{bmatrix} x'_2 \\ y'_2 \\ z'_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \alpha \\ 0 & -\alpha & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\beta & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \gamma & 0 \\ -\gamma & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_1\varphi_1 - \Delta x \\ R_1\theta_1 - \Delta y \\ R_1 - \Delta z \end{bmatrix}, \quad (9)$$

где для свободных векторов  $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 0$ .

**Потенциальная возможность измерения высоты объекта.** Пусть неподвижный объект  $AB$  высотой  $h$  (рис. 2) находится на поверхности в точке, принадлежащей элементу дискретизации прямоугольной сетки координат. Носитель РТЛС движется по курсу в сторону  $AB$ , наблюдая объект в момент времени  $t$  под некоторым углом места  $\theta$  к горизонтальной линии движения при азимуте  $\varphi = 0$ . Обозначим точками  $A$  и  $B$  вершину и основание объекта, точкой  $O$  — положение носителя РТЛС, удаленного от точек  $A$  и  $B$  на расстояния  $R_A = OA$  и  $R_B = OB$ . Точка  $A$  наблюдается из  $O$  под углом  $\theta_A$ , точка  $B$  — под углом  $\theta_B$ . Разность этих углов ( $\Delta\theta = \theta_B - \theta_A$ ) представляет разрешающую способность РТЛС по углу места, необходимую для обнаружения объекта высотой  $h$ .

Из треугольника  $OAB$  по теореме синусов устанавливается

$$\frac{h}{\sin \Delta\theta} = \frac{R_A}{\sin(\pi/2 - \theta_B)} = \frac{R_B}{\sin(\pi/2 - \theta_A)},$$

откуда при малых  $\Delta\theta$ ,  $\theta = \theta_A \approx \theta_B$  и  $R = R_A \approx R_B$  получается зависимость

$$\Delta\theta \approx h \frac{\cos \theta}{R}. \quad (10)$$

Из (10) следует, например, что при наблюдении РТЛС неподвижного объекта высотой  $h = 5$  м под углом  $\theta = \pi/3$  на расстоянии  $R = 1000$  м требуется разрешающая способность по углу места  $\Delta\theta = 0,0025$  рад или  $0,14^\circ$ . Это означает, что при ширине ДН (на уровне 0,5 мощности) в  $1^\circ$  требуется повысить разрешающую способность РТЛС не менее чем в 7 раз. При этом высоту объекта целесообразно измерять в режиме его облета РТЛС на малой высоте, т. е. при наблюдении под малым углом  $\theta$ .

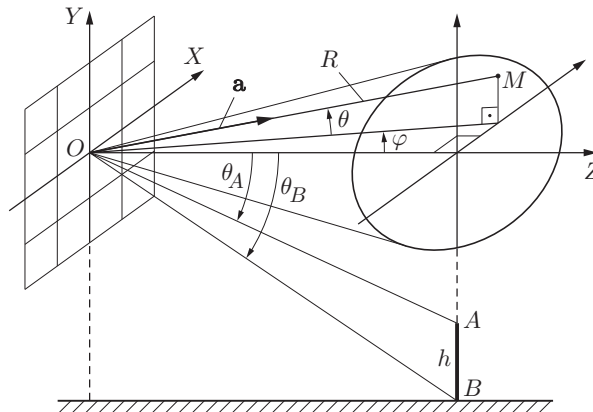


Рис. 2

**Метод повышения разрешающей способности РТЛС.** Повысить разрешающую способность РТЛС по угловым координатам можно на основе восстановления изображений по методике [3], обобщенной на случай модели (2). Решение задачи восстановления сводится к нахождению оценки  $\hat{\mathbf{U}}$  вектора  $\mathbf{U}$  в (2) по МНК:

$$f(\mathbf{U}) = (\mathbf{S} - G\mathbf{U})^{*T}(\mathbf{S} - G\mathbf{U}) \rightarrow \min_{\mathbf{U}}, \quad (11)$$

где  $*T$  — символ комплексного сопряжения и транспонирования. После дифференцирования скалярной функции (11) по вектору  $\mathbf{U}$ :

$$\frac{\partial}{\partial \mathbf{U}} (\mathbf{S} - G\mathbf{U})^{*T}(\mathbf{S} - G\mathbf{U}) = -2G^{*T}(\mathbf{S} - G\mathbf{U}) = \mathbf{O},$$

где  $\mathbf{O}$  — нулевой вектор-столбец, получим следующий результат:

$$\hat{\mathbf{U}} = H\mathbf{S}, \quad H = (G^{*T}G + \delta E)^{-1}G^{*T}, \quad (12)$$

где  $H$  — матрица комплексных весовых коэффициентов;  $E$  — единичная матрица;  $\delta$  — комплексный параметр регуляризации, необходимый для обращения матрицы  $G^{*T}G$  в тех случаях, если она плохо обусловлена.

В качестве оценок амплитуд поля излучения  $U(t, i, j)$  берутся модули элементов вектора  $\mathbf{U}$ , которые для вывода на экран построчно располагаются в составе  $M \times N$ -матрицы  $\hat{U}$  с элементами  $\hat{u}(t, i, j)$ ,  $i = \overline{-m, m}$ ,  $j = \overline{-n, n}$ . Матрица  $\hat{U}$  представляет собой восстановленное в дискретный момент времени  $t$  в пределах ширины ДН амплитудное изображение поверхности с повышенной в несколько раз разрешающей способностью по углам. Для расширения зоны обзора осуществляется построчное сканирование антенны со смещением линии визирования на ширину ДН.

Для модели измерений (3) задача восстановления изображения заключается в оптимальном оценивании матрицы  $U$  на основе матрицы измерений  $S$ , связанной с  $U$  уравнением (3). Решение задачи по критерию МНК сводится к минимизации следа  $\text{tr}$  матрицы  $F$  взятием производной по  $U$ :

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial U} \text{tr}[F(U)] &= \frac{\partial}{\partial U} \text{tr}[(S - G_1UG_2)^{*T}(S - G_1UG_2)] = \\ &= -2G_1^{*T}(S - G_1UG_2)G_2^{*T} = O, \end{aligned}$$

где  $O$  — нулевая матрица. Отсюда  $G_1^{*T}G_1UG_2G_2^{*T} = G_1^{*T}SG_2^{*T}$ ,

$$\hat{U} = (G_1^{*T}G_1)^{-1}G_1^{*T}SG_2^{*T}(G_2G_2^{*T})^{-1}. \quad (13)$$

Для реализации (13) применяется двухэтапная процедура:

$$\hat{Z} = H_1S \quad \Rightarrow \quad \hat{Z}^{*T}, \quad (14)$$

$$\hat{U}^{*T} = H_2^{*T}\hat{Z}^{*T} \quad \Rightarrow \quad \hat{U} = (\hat{U}^{*T})^{*T}, \quad (15)$$

где матрицы весовых коэффициентов вычисляются заранее с использованием процедур обращения матриц:

$$H_1 = (G_1^{*T}G_1 + \delta E)^{-1}G_1^{*T}, \quad H_2 = G_2^{*T}(G_2G_2^{*T} + \delta E)^{-1}.$$

Как показывают результаты расчета количества операций, алгоритм (14), (15) в вычислительном плане имеет значительно более высокое быстродействие по сравнению с (12)

за счет использования матричной формы и меньшего размера матриц  $G_1, G_2$  в сравнении с  $G$  в (12).

**Корреляционно-экстремальный метод совмещения кадров РТИ.** Пусть в последовательности моментов времени  $t_1, t_2, \dots, t_L$  получены матрицы амплитудного изображения участка поверхности  $\hat{U}_\mu = (\hat{U}(t_\mu, i, j))$ ,  $\mu = \overline{1, L}$ , в режиме его облета носителем РТЛС. Если ось антенны в каждый  $\mu$ -й момент направлена на один и тот же объект (ориентир) поверхности, то в случае отсутствия ошибок пересчета координат  $i, j$ -е элементы матриц будут соответствовать одним и тем же элементам поверхности. В действительности носитель РТЛС смещается относительно ориентиров случайным образом и изображение поверхности движется в матрице изображения. Кроме того, ошибки измерения дают погрешности пересчета координат, что приводит к искажению РТИ. Возникает проблема уменьшения влияния ошибок измерения на точность формирования РТИ в условиях движущегося изображения. Указанная проблема решается одним из методов корреляционно-экстремального совмещения соседних кадров [4] следующим образом.

1. Пусть в момент  $t_1$  получена матрица  $\hat{U}_1 = (\hat{U}(t_1, i, j))$ , которая ставится в соответствие матрице  $\hat{U}_2 = (\hat{U}(t_2, i, j))$ . На основе данных навигационной системы о движении объекта-носителя РТЛС (измерений углов поворота  $\alpha, \beta, \gamma$  и смещений  $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ ) координаты центра  $x_1, y_1$  каждого  $i, j$ -го элемента матрицы  $\hat{U}_1$  в соответствии с формулами (5), (9), учитывающими  $\alpha, \beta, \gamma$  и  $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ , пересчитываются на момент  $t_2$ , т. е. находятся экстраполированные значения координат  $x'_2, y'_2$  и соответствующие им номера  $i', j'$ , при этом  $z_1$  в (5), (9) полагается равным нулю (плоское изображение), а координата  $z'_2$  не используется. Значения элементов матрицы  $\hat{U}_1 = (\hat{U}(t_1, i, j))$  переписываются в матрицу экстраполированного изображения  $\hat{U}'_2 = (\hat{U}'(t_2, i', j'))$ , координаты которых попадают в поле второго кадра  $\hat{U}_2$ , в противном случае для  $i', j'$  фиксируются пропуски.

2. Рассматривается центральная часть матрицы  $\hat{U}'_2$  — область  $D$ , в которой пропуски заведомо отсутствуют. Даются приращения координатам  $i, j$  по всем элементам  $\hat{U}'_2$  в области  $D$  на малое число элементов дискретизации  $\Delta i, \Delta j$ . Оптимальные значения  $\Delta i, \Delta j$  определяются критерием близости двух изображений  $\hat{U}'_2$  и  $\hat{U}_2$ :

$$\sum_{i, j \in D} \sum |\hat{U}'(t_2, i + \Delta i, j + \Delta j) - \hat{U}(t_2, i, j)| \rightarrow \min_{\Delta i, \Delta j}. \quad (16)$$

3. На основе найденных значений  $\Delta i, \Delta j$  корректируются экстраполированные номера  $i', j'$ . Тем самым устанавливается более точное соответствие между элементами соседних матриц РТИ в смысле принадлежности каждой пары этих элементов одному и тому же элементу поверхности и, как следствие, уменьшается влияние ошибок измерения на пересчет координат и определение векторов  $\mathbf{a}'_1, \mathbf{a}_2, \mathbf{b}_1$  при вычислении дальностей  $R_1, R_2$  в (7), вследствие чего повышается точность формирования РТИ.

4. Амплитуды соответствующих элементов соседних кадров усредняются во времени  $t$  с помощью известных рекуррентных фильтров [4]. При усреднении сглаживаются ошибки измерения и увеличивается отношение сигнал/шум, что приводит к повышению разрешающей способности РТИ по угловым координатам и качеству изображения [5].

#### Алгоритм формирования трехмерного РТИ на базе РТЛС.

1. В каждый дискретный момент времени  $t_\mu$ ,  $\mu = 1, 2, \dots, L$ , формируются двумерные РТИ  $\hat{U}(t_\mu, i, j)$  в соответствии с алгоритмом (12) или (14), (15).

2. Координаты  $x_1, y_1$  центра каждого  $i, j$ -го элемента матрицы  $\hat{U}(t_{\mu-1}, i, j)$  пересчитываются в  $x'_2, y'_2$  на основе навигационных данных по формуле (5) или (9) при  $z_1 = 0$  и округляются до элементов дискретизации  $i', j'$ .

3. Если  $i', j'$  попадают в поле матрицы  $\hat{U}(t_\mu, i, j)$ , то  $i, j$ -е амплитуды  $\hat{U}(t_{\mu-1}, i, j)$  переписываются в соответствующие  $i', j'$ -е элементы экстраполированной матрицы  $\hat{U}'(t_\mu, i', j')$ . Установленное соответствие между  $i, j$  и  $i', j'$  запоминается. В противном случае фиксируется непопадание  $i', j'$ .

4. Корреляционно-экстремальным методом по формуле (16) корректируется соответствие между всеми парами  $i, j$  и  $i', j'$ . Изменения запоминаются.

5. Для каждого  $i', j'$ -го элемента матрицы  $\hat{U}(t_\mu, i', j')$ , которому поставлен в соответствие  $i, j$ -й элемент  $\hat{U}(t_{\mu-1}, i, j)$ , устанавливаются координаты векторов  $\mathbf{a}'_1, \mathbf{a}_2, \mathbf{b}_1$  и определяется дальность  $R_\mu(i, j)$  в (7).

6. Операции 1–5 повторяются в последовательности моментов времени  $t_\mu$ . Найденные значения амплитуд  $\hat{U}(t_\mu, i, j)$ , дальностей  $R_\mu(t_\mu, i, j)$  и запомненные значения углов места  $\theta_\mu(t_\mu, i, j)$  усредняются во времени  $t$ . В результате к моменту  $t_L$  формируются матрицы  $\tilde{U}(i, j)$ ,  $\tilde{R}(i, j)$  и  $\tilde{\theta}(i, j)$ .

7. В момент  $t_L$  заполняется матрица усредненных высот рельефа и объектов на поверхности, элементы которой вычисляются по формуле

$$\tilde{h}(i, j) = \tilde{H} - \tilde{R}(i, j) \sin \tilde{\theta}(i, j), \quad (17)$$

где  $\tilde{H}$  — усредненное значение высоты объекта-носителя РТЛС.

8. Полученные матрицы  $\tilde{U}(i, j)$  и  $\tilde{h}(i, j)$  представляют собой трехмерное изображение поверхности и неподвижных объектов на поверхности, которое с помощью алгоритмов отображения выводится на экран индикатора.

**Заключение.** Предложенные в данной работе методы позволяют на базе перспективных многоканальных бортовых РТЛС измерять дальность до элементов дискретизации поверхности и неподвижных объектов на поверхности в режиме облета контролируемого участка и на основе этого формировать трехмерное изображение поверхности. Результаты обобщаются на случай измерения пространственных координат движущихся по поверхности объектов [6] и применимы также для оптических систем. Для повышения точности формирования РТИ целесообразно использовать комплексирование систем пассивной и активной радиолокации.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пирогов Ю. А., Тимановский А. Л. Сверхразрешение в системах пассивного радиовидения миллиметрового диапазона // Радиотехника. 2006. № 3. С. 14–19.
2. Монзинго Р. А., Миллер Т. У. Адаптивные антенные решетки: Введение в теорию /Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1986. 448 с.
3. Клочко В. К. Методы оптимального восстановления радиолокационных изображений поверхности // Автометрия. 2005. 41, № 6. С. 62–73.
4. Баклицкий В. К., Юрьев А. Н. Корреляционно-экстремальные методы навигации. М.: Радио и связь, 1982. 256 с.
5. Клочко В. К. Восстановление радиоизображений на базе многоканальной РЛС // Изв. вузов России. Сер. Радиоэлектроника. 2007. Вып. 4. С. 51–61.
6. Клочко В. К. Измерение бортовой системой пассивного видения пространственных координат движущихся по поверхности объектов // Изв. вузов России. Сер. Радиоэлектроника. 2008. Вып. 5. С. 60–64.

Поступила в редакцию 2 апреля 2008 г.