

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 μ -й момент времени t_μ , $\mu = \overline{1, L}$, 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 α, β, γ (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 θ_i и азимутом φ_j , обозначенные через θ_1 и φ_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:

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

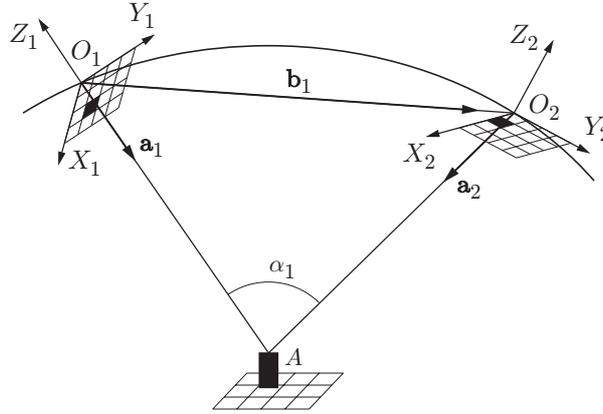


Рис. 1

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 находят 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 α_1 решение (7) может быть неустойчивым, поэтому оценивание дальности следует производить при достаточно больших перемещениях носителя $|\mathbf{b}_1|$.

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

В вычислительном плане возможны некоторые упрощения. Для малых углов φ_1, θ_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 θ 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 θ_A , точка B — под углом θ_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° 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 θ .

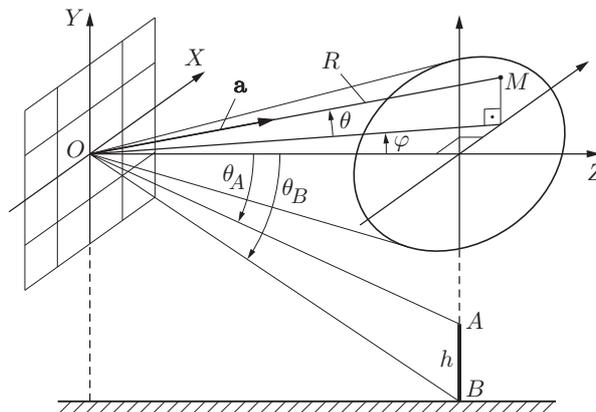


Рис. 2

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; δ — 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 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 μ -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 α, β, γ 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 α, β, γ 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_μ , $\mu = 1, 2, \dots, L$, 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_μ . 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.