

УДК 621.319

В.К. Клочко

ПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ТРЕХМЕРНОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ НА БАЗЕ БОРТОВОГО РАДИОТЕПЛОЛОКАТОРА

Исследована потенциальная возможность и разработан алгоритм формирования трехмерного изображения поверхности на базе бортовой многоканальной РТЛС в режиме облета контролируемого участка поверхности на малой дальности.

Введение. При построении систем пассивного радиовидения на базе бортовых радиотеплолокационных станций (РТЛС) миллиметрового диапазона возникает необходимость получения радиотепловых изображений (РТИ) поверхности и объектов на поверхности. Исследования, проведенные в этом направлении (например, [1]) на базе круговых сканирующих антенн, свидетельствуют о том, что пассивное радиовидение пока еще не достигло своих потенциальных возможностей, и перспектива его развития связана с внедрением многоканальных систем с антенными решетками [2]. Внедрение антенных решеток повысит качество и скорость формирования изображений, и на этой технической основе может быть решена актуальная проблема формирования трехмерных РТИ в режиме облета носителем РТЛС контролируемого участка поверхности. Ниже предлагается решение этой проблемы на основе пространственно-временной обработки РТЛИ с учетом движения РТЛС.

Цель работы – исследование потенциальной возможности получения трехмерного изображения поверхности в бортовых РТЛС и разработка алгоритма формирования трехмерного 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 излу-

чения 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 ($q = \overline{1, Q}$) справедлива следующая дискретная модель измерений:

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

где суммирование ведется от центра антенны (линии визирования) по i, j -м элементам дискретизации угла места (по $i = \overline{-m, m}$) и азимута (по $j = \overline{-n, n}$) угломерной области размера $M \times N = (2m+1) \times (2n+1)$ в системе координат носителя РТЛС; $\dot{g}_q(i_1, j_1) = a_q(i_1, j_1)e^{i\Phi_q(i_1, j_1)}$ – нормированные комплексные коэффициенты ДН q -го канала, известные фазы которых $\Phi_q(i, j)$ 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; $\dot{u}_q(t, i_1, j_1) = U(t, i_1, j_1)e^{-i\Phi_q(t, i_1, j_1)}$ – 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 $\psi(t, i, j)$, равномерно распределенной на $[0, 2\pi]$; $\dot{p}_q(t) = \xi_q(t) + i\eta_q(t)$ – нормальная помеха: $\xi, \eta \in N(0, \sigma_p^2)$.

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

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

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

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

$$S = G_1 \cdot U \cdot G_2 + P, \quad (3)$$

где S – QxK-матрица q,k-х измерений $s_{qk}(t)$, расположенных в q-х строках и k-х столбцах; G_1 – QxM-матрица q,i-х коэффициентов ДН $\dot{g}_{q1}(i)$; U – MxN-матрица i,j-х искоемых комплексных амплитуд поля излучения $u(t, i, j)$; G_2 – NxK-матрица j,k-х коэффициентов ДНА $\dot{g}_k(j)$; P – QxK-матрица $p_{qk}(t)$.

Носитель РТЛС находится в самолетной прямоугольной системе координат, центр которой совмещен с центром носителя, ось OY совпадает с вектором скорости \bar{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 $O_2X_2Y_2Z_2$, которые расположены определенным образом относительно самолетной системы. Оси O_1Z_1 и O_2Z_2 представляют линию визирования 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 А, расположенной на поверхности, направлен i,j-й луч, положение которого определяется углом места θ_i , отсчитываемым от плоскости $O_1X_1Z_1$, и азимутом φ_j , отсчитываемым от оси O_1Z_1 . По этому лучу идет в направлении антен-

ны i,j-я составляющая $u(t, i, j)$ излучаемого сигнала. Строится единичный вектор \bar{a}_1 – орт вектора $\overline{O_1A}$, направленный по лучу к точке А, его координаты в прямоугольной системе $O_1X_1Y_1Z_1$:

$$\begin{aligned} \bar{a}_1 &= (x_1, y_1, z_1) = \\ &= (\cos \theta_1 \sin \varphi_1, \sin \theta_1, \cos \theta_1 \cos \varphi_1). \end{aligned} \quad (4)$$

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

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

полагая в (5) для свободных векторов приращение параллельного переноса равными нулю: $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 0$. Получается вектор $\bar{a}'_1 = (x'_2, y'_2, z'_2)$.

В текущий момент t_2 в системе координат $O_2X_2Y_2Z_2$ строится вектор \bar{a}_2 – орт вектора $\overline{O_2A}$, направленный к той же точке А:

$$\begin{aligned} \bar{a}_2 &= (x_2, y_2, z_2) = \\ &= (\cos \theta_2 \sin \varphi_2, \sin \theta_2, \cos \theta_2 \cos \varphi_2). \end{aligned} \quad (6)$$

В системе координат $O_2X_2Y_2Z_2$ рассматриваются три вектора: \bar{a}'_1 , \bar{a}_2 и вектор параллельного переноса $\bar{b}_1 = \overline{O_1O_2} = (-\Delta x, -\Delta y, -\Delta z)$. Если измерения координат векторов выполнены без ошибок, то три вектора \bar{a}'_1 , \bar{a}_2 и \bar{b}_1 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 А.

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 дальности:

$$\begin{aligned} \cos \alpha_1 &= \frac{|(\bar{a}'_1, \bar{a}_2)|}{|\bar{a}'_1| \cdot |\bar{a}_2|}, \quad \cos \beta_1 = \frac{|(\bar{b}_1, \bar{a}'_1)|}{|\bar{b}_1| \cdot |\bar{a}'_1|}, \\ \frac{|\bar{b}_1|}{\sin \alpha_1} &= \frac{R_2}{\sin \beta_1} = \frac{R_1}{\sin(\alpha_1 + \beta_1)} \Rightarrow \\ \Rightarrow R_2 &= |\bar{b}_1| \frac{\sin \beta_1}{\sin \alpha_1}, \quad R_1 = |\bar{b}_1| \frac{\sin(\alpha_1 + \beta_1)}{\sin \alpha_1}. \end{aligned} \quad (7)$$

Такие расчеты повторяются для нескольких моментов времени t_1, t_2, \dots, t_L при наблюдении А

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 :

$$\bar{R}_L = \frac{1}{L} \sum_{\mu=1}^L R_{\mu}.$$

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

В вычислительном плане возможны некоторые упрощения. При малых углах φ_1, θ_1 (в пределах ДН) векторы (4), (6) приближенно можно определить:

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

При малых углах поворота упрощается формула (4):

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

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

Потенциальная возможность измерения высоты объектов. Пусть объект высотой h находится на поверхности в точке А, принадлежащей элементу дискретизации прямоугольной сетки координат. Носитель РТЛС движется по курсу в сторону точки А, наблюдая ее в момент времени t под некоторым углом места θ к горизонтальной линии движения, при азимуте $\varphi = 0$. Обозначим точками А и В вершину и основание объекта, точкой О – положение носителя РТЛС, удаленного от точек А и В на $R_A = OA$ и $R_B = OB$. Точка А наблюдается из точки О под углом θ_A , точка В – 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 ОАВ 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 $\Delta\theta = 0,0025 \text{ рад}$ или $0,14^\circ$. Это означает, что при ширине ДА (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 на малой высоте полета, то есть при наблюдении под малым углом θ .

Иллюстрации. На рисунке 1 показана антенная система координат, использованная в формулах (4) – (7) при определении координат вектора \bar{a} (на рисунке 1 вектор \bar{a} направлен в сторону точки М). Здесь же показаны углы места θ_A и θ_B при определении высоты h объекта АВ на поверхности по формуле (10). На рисунке 2 показано движение РТЛС по траектории облета участка поверхности, на котором расположен высотный объект. В двух соседних матрицах РТИ отмечены (зачернены) элементы, между которыми установлено соответствие: они дают координаты векторов \bar{a}_1 и \bar{a}_2 , направленных на объект. На векторах \bar{a}_1, \bar{a}_2 и векторе перемещения \bar{b}_1 построен треугольник AO_1O_2 , по углам которого определяются дальности R_1 и R_2 .

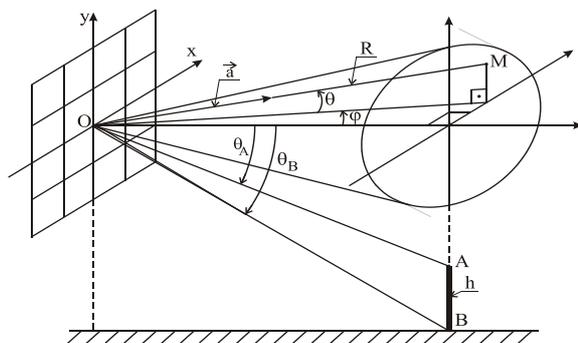


Рисунок 1

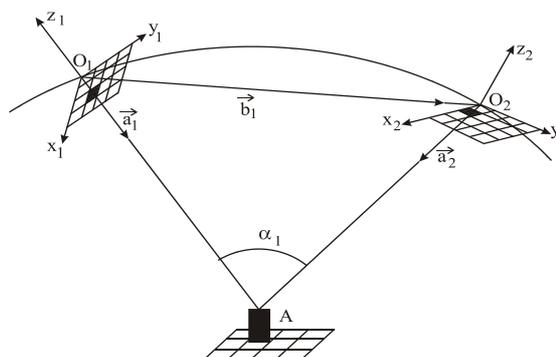


Рисунок 2

Замечание. Дальность при известной высоте наблюдателя H_μ , определенной навигационной системой в текущий момент t_μ вместе с вектором нормали к поверхности \vec{n}_μ , можно найти вторым способом с помощью модуля скалярного произведения векторов \vec{a}_μ и \vec{n}_μ по формуле

$$R_\mu = \frac{H_\mu}{|(\vec{a}_\mu, \vec{n}_\mu)|}$$

и для уменьшения влияния ошибок навигационных измерений усреднять вместе с (7).

Методы повышения разрешающей способности РТЛС. Повысить разрешающую способность РТЛС по угловым координатам можно на основе восстановления изображений по методике [3]. Решение задачи восстановления сводится к нахождению оценки \hat{U} вектора \bar{U} в (2) по методу наименьших квадратов (МНК):

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

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

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

где \bar{O} – нулевой вектор-столбец, получается следующий результат:

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

где H – матрица комплексных весовых коэффициентов; E – единичная матрица; δ – комплексный параметр регуляризации, необходимый для обращения матрицы $G^{*T}G$ в тех случаях, когда число измерительных каналов Q меньше числа оцениваемых параметров MN .

В качестве оценок амплитуд поля излучения $U(t, i, j)$ берутся модули элементов вектора \bar{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 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 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:

$$\begin{aligned} G_1^{*T}G_1UG_2G_2^{*T} &= G_1^{*T}SG_2^{*T} \Rightarrow \\ \Rightarrow \hat{U} &= (G_1^{*T}G_1)^{-1}G_1^{*T} \cdot S \cdot G_2^{*T}(G_2G_2^{*T})^{-1}. \end{aligned} \quad (13)$$

Для реализации (13) применяется двухэтапная процедура:

$$1) \quad \hat{Z} = H_1 \cdot S \Rightarrow \hat{Z}^{*T}, \quad (14)$$

$$2) \quad \hat{U}^{*T} = H_2^{*T} \cdot \hat{Z}^{*T} \Rightarrow \hat{U} = (\hat{U}^{*T})^{*T}, \quad (15)$$

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

$$H_1 = (G_1^{*T}G_1 + \delta \cdot E)^{-1}G_1^{*T},$$

$$H_2 = G_2^{*T}(G_2G_2^{*T} + \delta \cdot E)^{-1}.$$

Как показывают результаты расчета количества операций, алгоритм (14), (15) в вычислительном плане имеет значительно более высокое быстродействие по сравнению с алгоритмом (12) за счет использования матричной формы и меньшего размера матриц G_1, G_2 в сравнении с матрицей G в (12).

Уменьшение влияния ошибок измерения на точность формирования 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 линия визирования антенны в каждый μ -й момент направлена на один и тот 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 ошибки пересчета координат, что приводит к искажению РТИ. Возникает проблема уменьшения влияния ошибок измерения на точность формирования РТИ в условиях движущегося изображения. Указанная проблема решается методами корреляционно-экстремального совмещения соседних кадров и пространственно-временной фильтрации [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 (экстраполируются) на момент t_2 , то есть 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 $\hat{U}'_2 = (\hat{U}(t'_2, i', j'))$ по всем элементам i', j' , координаты которых попадают в поле 2-го 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 матрицы \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 , например:

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

3. На основе найденных значений $\Delta i, \Delta j$ корректируются экстраполированные координаты 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 координат векторов $\vec{a}'_1, \vec{a}'_2, \vec{b}'_1$, 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 повышается отношение сигнал-шум, что приводит к повышению разрешающей способности РТИ по угловым координатам и качеству изображения [3].

Снижение влияния вибраций на качество изображения. К вибрациям можно отнести как

физическое “дрожание” носителя РТЛС, так и накапливающиеся случайные ошибки измерения и округления до элементов дискретизации. При длительном осреднении кадров указанные ошибки, а также помехи суммируются, и к моменту времени t_L получается равномерно смазанное РТИ с повышенным отношением сигнал-шум. Для частичного устранения влияния вибраций рассматривается модель равномерного смазывания матрицы РТИ в малой окрестности каждого i, j -го элемента ($i = \overline{1, I}, j = \overline{1, J}$):

$$\hat{U}(i, j) = \sum_{i_1=-m_1}^{m_1} \sum_{j_1=-n_1}^{n_1} U(i + i_1, j + j_1) + p(i, j), \quad (17)$$

где $\hat{U}(i, j)$ – амплитудное РТИ, смазанное за счет вибраций; $U(i, j)$ – искомое РТИ как функция двух переменных i, j ; $p(i, j)$ – центрированные гауссовские помехи; $m_1 < m, n_1 < n$ (например, $m_1 = n_1 = 1$).

Модель (17) отличается от (1) тем, что коэффициенты смазывания $g_q(i, j) = 1, \forall i, j$, а измерения представлены не Q каналами, а множеством $I \cdot J$ элементов матрицы РТИ, причем число измерений меньше числа оцениваемых параметров. Решение такой некорректной задачи заключается в нахождении псевдооптимальных МНК-оценок $U(i, j)$ с введением процедур регуляризации [5]. Алгоритм восстановления сводится к следующему.

1. Относительно каждого i, j -го элемента $i = \overline{m_1, I - m_1}, j = \overline{n_1, J - n_1}$ искомой матрицы изображения U строится плавающее окно ограниченного размера $M_1 \times N_1 = (2m_1 + 1) \times (2n_1 + 1)$, которое меняет свое положение, смещаясь построчно на один элемент дискретизации.

2. Амплитуды $\hat{U}(i + i_1, j + j_1)$, взятые в этом окне, суммируются по i_1 и j_1 с весовыми коэффициентами $\omega_k(i_1, j_1)$, расчет которых осуществляется заранее по методике МНК [5]. В результате получается оценка

$$\tilde{U}(i, j) = \sum_{i_1=-m_1}^{m_1} \sum_{j_1=-n_1}^{n_1} \omega(i_1, j_1) \cdot \hat{U}(i + i_1, j + j_1) \quad (18)$$

восстановленного изображения в центральном элементе окна.

3. Полученные по совокупности i, j -х элементов оценки $\tilde{U}(i, j), i = \overline{m_1, I - m_1}, j = \overline{n_1, J - n_1}$ располагаются в составе $(I - 2m_1) \times (J - 2n_1)$ -матрицы U , которая представляет изображение с частичным устранением смазывания.

Методика вычисления весовых коэффициентов в (18) аналогична (11), (12). При этом модель (18) получает векторно-матричную форму:

$$\hat{U}(i, j) = G \cdot \bar{U}(i, j) + \bar{P}(i, j), \quad (19)$$

где $\hat{U}(i, j)$ – $M_1 N_1$ -вектор-столбец смазанных оценок (18), взятых в окрестности i, j -го элемента; G – $M_1 N_1 \times (M_1 + 2m_1)(N_1 + 2n_1)$ -матрица ленточного типа с единичными элементами; $\bar{U}(i, j)$ – $(M_1 + 2m_1)(N_1 + 2n_1)$ -вектор-столбец искомым оценок; $\bar{P}(i, j)$ – $M_1 N_1$ -вектор-столбец помех.

Оценивание действительного вектора (19) осуществляется в соответствии с (12) без операции комплексного сопряжения. В качестве оценки (18) берется центральный элемент вектора (19) с наименьшей дисперсией ошибки оценивания. Весовые коэффициенты $\omega(i, j)$ в (18) – это элементы центральной строки матрицы весовых коэффициентов H , найденной в (12).

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 алгоритмами (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 ближайших 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 не попадание 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 элемент i, j -й элемент матрицы $\hat{U}(t_{\mu-1}, i, j)$ уста-

навливаются координаты векторов $\bar{a}'_1, \bar{a}'_2, \bar{b}'_1$ и определяется дальность $R_\mu(i, j)$ в (7).

6. Операции пп.1 – 5 повторяются в последовательности моментов времени t_μ , а найденные значения $\hat{U}(t_\mu, i, j)$ и $R_\mu(t_\mu, i, j)$ усредняются во времени t . В результате к моменту t_L формируются две матрицы: $\tilde{U}_L(i, j)$ и $\tilde{R}_L(i, j)$.

7. В момент t_L среди усредненных дальностей $\tilde{R}_L(i, j)$ находится максимальная дальность по i, j и заполняется матрица относительных высот рельефа и объектов на поверхности:

$$\tilde{h}_L(i, j) = \max_{i, j} \tilde{R}_L(i, j) - \tilde{R}_L(i, j). \quad (20)$$

8. Предусматриваются операции снижения влияния вибраций в усредненных матрицах $\tilde{U}_L(i, j)$ и $\tilde{h}_L(i, j)$ в соответствии с (17) – (19).

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

Заключение. Полученные результаты показывают потенциальную возможность формирования трехмерных изображений поверхности и неподвижных объектов на поверхности в системах пассивной радиолокации при определенных условиях. Результаты применимы также для оптических систем. Для повышения точности формирования РТИ целесообразно комплексирование с системами активной радиолокации.

Библиографический список

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. Потенциальные возможности восстановления радиоизображений // Вестник РГРТА. Вып. 19. 2006. С. 10 – 18.
4. Бакицкий В.К., Юрьев А.Н. Корреляционно-экстремальные методы навигации. М.: Радио и связь, 1982. 256 с.
5. Клочко В.К. Методы оптимального восстановления радиолокационных изображений поверхности // Автоматрия. 2005. Т. 41. № 6. С. 62 – 73.