

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ФОРМИРОВАНИЯ ТРЕХМЕРНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ОБЪЕКТОВ В БОРТОВЫХ СИСТЕМАХ ВИДЕНИЯ

Клочко В.К., д.т.н., профессор Рязанского государственного радиотехнического университета,
e-mail: KlochkoVK@mail.ru

Ключевые слова: радиолокация, радиотеплолокация, трехмерные изображения, разрешающая способность.

Введение

Современные бортовые пассивные или активные системы наблюдения за наземными объектами при маловысотном полете летательных аппаратов (ЛА) представляют собой многофункциональные комплексы, позволяющие наблюдать за наземной обстановкой и осуществлять ориентацию на местности независимо от времени суток и метеоусловий. Измерительными датчиками таких систем являются антенны или антенные решетки (АР) [1], принимающие радиолокационный (РЛ) или радиотеплолокационный сигнал (РТЛ) в радиолокационном диапазоне длин волн. Результатом алгоритмической обработки принятых сигналов является плоское (двумерное) изображение участка земной поверхности и объектов на поверхности. Однако все возрастающее требование повышения безопасности маловысотных полетов ЛА диктует необходимость измерения высоты рельефа местности и формирования трехмерных изображений высотных объектов по курсу полета ЛА в реальном времени. С задачей получения трехмерных изображений в РЛ и РТЛ системах (РЛС, РТЛС) тесно связана задача повышения разрешающей способности этих систем по угловым координатам [2].

Цель работы – разработка математических методов и алгоритмов формирования трехмерных изображений и повышения разрешающей способности антенны по угловым координатам на базе бортовых РЛС и РТЛС.

Формирование трехмерных изображений в доплеровских РЛС

В РЛС с синтезированной апертурой антенны традиционно получают двумерные изображения земной поверхности в координатах азимут-дальность (или доплеровская частота-дальность) при боковом и переднебоковом обзорах. В режиме доплеровского «обужения луча» [3] система наблюдения представляет собой бортовую моноимпульсную доплеровскую РЛС, работающую в миллиметровом диапазоне в режиме излучения с низкочастотным повторением, совмещенную с бортовым компьютером и навигационными датчиками. Носитель РЛС совершает маловысотный полет на постоянной высоте h с постоянной скоростью v . РЛС работает в режиме передне-бокового обзора, и неоднозначность наблюдений, свойственная режиму переднего обзора, отсутствует.

Предложены методы и алгоритм формирования трехмерных изображений земной поверхности и объектов на поверхности по данным наблюдения бортовой радиолокационной и радиотеплолокационной станций.

В текущий дискретный μ -й момент времени обзора t_μ , привязанный к моменту приема отраженного сигнала, РЛС находится в самолетной системе координат O_c, x_c, y_c, z_c . За начало координат принимается точка O_c центра масс самолета, ось $O_c x_c$ направлена вперед по оси самолета, ось $O_c y_c$ лежит в плоскости левого крыла. Одновременно рассматривается сферическая система координат O_c, r, φ, θ , где r – дальность; φ – азимут; θ – угол места, отсчитываемый от горизонтальной плоскости O_c, x_c, y_c . В режиме сканирования луча направляющий вектор \vec{a} центра антенны занимает ряд фиксированных положений \vec{a}_{kl} по азимуту и углу места, как показано на рис. 1а.

Угловые координаты φ, θ диаграммы направленности антенны (ДНА) составляют $\varphi_0 \pm \Delta\varphi/2$ и $\theta_0 \pm \Delta\theta/2$, где $\Delta\varphi$ и $\Delta\theta$ – размеры ДНА по азимуту и углу места на уровне 0,5 мощности. По времени задержки отраженного сигнала на промежутке времени, соответствующем дальности r , формируется элемент разрешения по дальности размером $\Delta r: r \pm \Delta r/2$.

Элемент разрешения антенны образуется пересечением конической поверхности ДНА с вершиной в точке O_c и двух сферических поверхностей постоянного уровня дальности с центром в той же точке O_c .

Вводятся обозначения: α_j – угол между вектором путевой скорости \vec{v} и образующей конуса j -й проекции скорости $v_j = v \cdot \cos \alpha_j$; f_j – доплеровская частота, соответствующая v_j и вычисляемая как разность частот f_2 принимаемого и f_1 передаваемого сигналов в j -м направлении:

$$f_j = f_2 - f_1 = -\frac{2}{\lambda} \cdot \frac{dr}{dt} = \frac{2}{\lambda} v_j = \frac{2v}{\lambda} \cdot \cos \alpha_j, \quad (1)$$

где λ – длина волны несущей; dr/dt – отрицательная скорость уменьшения расстояния между РЛС и поверхностью в j -м направлении. Приращение частоты Δf_j связано с малым приращением угла $\Delta \alpha_j = \alpha_{j+1} - \alpha_j$:

$$\begin{aligned} \Delta f_j &= f_{j+1} - f_j = \frac{2v}{\lambda} (\cos \alpha_{j+1} - \cos \alpha_j) = \\ &= -\frac{2v}{\lambda} 2 \sin \frac{\alpha_j + \alpha_{j+1}}{2} \sin \frac{\Delta \alpha_j}{2} \approx -\frac{2v}{\lambda} \Delta \alpha_j \sin \alpha_j \end{aligned}$$

С учетом ускорения формула (1) усложняется:

$$f_j = f_2 - f_1 = -\frac{2}{\lambda} \cdot \left(\frac{dr}{dt} + \frac{d^2r}{dt^2} t \right) = \frac{2v}{\lambda} \cdot \cos \alpha_j - \frac{2v^2 \sin^2 \alpha_j}{\lambda \cdot r} t \quad (2)$$

Наличие доплеровских узкополосных фильтров с геометрической точки зрения означает рассеяние элемента разрешения антенны рядом конических поверхностей постоянного уровня доплеровской частоты f_j ($j = 1, 2, \dots$) с вершиной в точке O_c и осью симметрии, совпадающей с вектором путевой скорости \vec{v} . В результате образуются узкие пространственно-протяженные по угловым координатам элементы доплеровской частоты.

Выводится уравнение линии j -й доплеровской частоты [4]:

$$\cos \varphi \cos \theta = \cos \alpha_j \quad (3)$$

Уравнение (3) в сочетании с моноимпульсным методом измерения угловых координат используется для формирования трехмерного изображения следующим образом. При данном положении ДНА сигнал $s(t)$, принятый одновременно в Q измерительных каналах РЛС: $s_q(t)$, $q = \overline{1, Q}$, селектируется в i -х элементах разрешения по дальности: $s_q(t_i)$, $i = \overline{1, I}$, где I – число таких элементов. В каждом i -м элементе дальности сигнал $s_q(t_i)$ селектируется по доплеровской частоте f_j в j -х узкополосных фильтрах и определяется амплитуда (модуль) $U_q(i, j)$ комплексной огибающей сигнала $\dot{u}_q(t_i, j)$ в каждом j -м фильтре ($j = \overline{1, J}$). При этом последовательность j -х элементов разрешения по частоте ставится в соответствие последовательности j -х элементов разрешения по углу α_j в соответствии с формулой (1) или (2). Для тех j -х фильтров, в которых амплитуда $U_q(i, j)$, $q = \overline{1, Q}$, превышает порог обнаружения (соответствует отражению от одного или большего числа элементов поверхности или высотных объектов), по совокупности q -х сигналов $\dot{u}_q(t_i, j)$ моноимпульсным методом с учетом (3) измеряются в самолетной системе координат значения азимута φ или угла места θ точечных отражателей,

находящегося на линии j -го элемента разрешения в i -м элементе дальности.

Операции повторяются для всех значений i, j . В результате определяются угловые координаты всех точечных отражателей на j -х линиях доплеровской частоты в зоне обзора РЛС, и формируется трехмерное изображение рельефа поверхности на момент времени t_μ в виде матриц амплитуд U и углов места Θ . Для удобства индикации матрицы U и Θ могут пересчитываться в матрицу амплитуд $U(i_1, j_1)$ и матрицу $H(i_1, j_1)$ высот в элементах дискретизации прямоугольной системы координат.

На рис.1а и 1б показано рассеяние элемента разрешения доплеровской частоты на более мелкие части за счет использования моноимпульсного метода измерения угловых координат в режимах построчного (а) и выборочного (б) обзора. При этом требуемое совмещение кадров изображения, полученных в отдельные моменты времени t_μ , достигается пересчетом координат на текущий момент времени t_μ с учетом параметров движения носителя РЛС.

Трудность практического применения метода заключается в согласовании систем измерения: угловых координат, доплеровской частоты и наземных координат.

Формирование трехмерных изображений в режиме реального луча

Некритичным к нестабильности полета ЛА, а также позволяющим получать изображение по курсу полета (передний обзор) является режим реального луча (РЛ) в РЛС. При работе бортовой РЛС в режиме РЛ многоканальная антенная система, представляющая в общем случае $Q \times K$ -плоскую решетку приемных элементов, сканирует зону обзора, смещаясь построчно по азимуту (по j) и углу места (по i) на заданное число элементов дискретизации. Ширина ДНА каждого приемного канала АР составляет $N = 2n + 1$ элементов дискретизации по азимуту и $M = 2m + 1$ элементов по углу места. При i, j -м положении антенны модель комплексной огибающей $\dot{S}_{qk}(t, i, j)$ отраженного сигнала на промежутке времени $[t, t + \Delta t]$, соответствующем элементу разрешения дальности, на выходе фильтров низких частот квадратурных каналов фазового детектирования q, k -го приемного канала имеет вид:

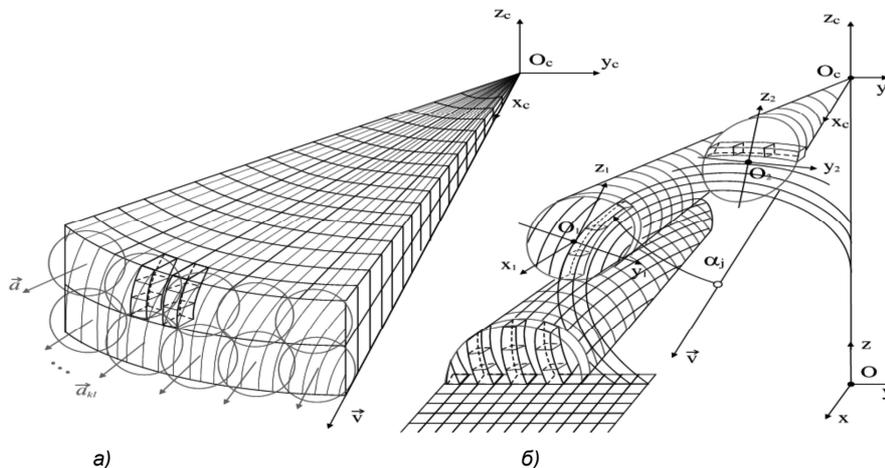
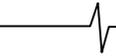


Рис.1. Формирование элементов разрешения доплеровской частоты



$$\begin{aligned} \dot{s}_{qk}(t, i, j) &= \\ &= \sum_{i_1=-m}^m \sum_{j_1=-n}^n \dot{g}_{qk}(i_1, j_1) \cdot \dot{u}_{qk}(t, i+i_1, j+j_1) + \dot{p}_{qk}(t, i, j) \quad (4) \\ q &= \overline{1, Q}, k = \overline{1, K}, i = \overline{1, I}, j = \overline{1, J}. \end{aligned}$$

В (4): $\dot{s}_{qk}(t, i, j) = S_{qk}(t, i, j) e^{-i\psi_{qk}(t, i, j)}$ – сигнал в квадратурных каналах фазового детектирования с измеряемыми амплитудой $S_{qk}(t, i, j)$ и фазой $\psi_{qk}(t, i, j)$, где символ i в показателе степени обозначает мнимую единицу; $\dot{g}_{qk}(i, j) = a_{qk}(i, j) e^{i\theta_{qk}(i, j)}$ – нормированные комплексные коэффициенты ДНА q, k -го канала; $\dot{u}_{qk}(t, i, j) = U(t, i, j) e^{-i[\varphi(t, i, j) + \gamma_{qk}(i, j)]}$ – полезная составляющая сигнала с амплитудой $U(t, i, j)$, несущей информацию о поле отражения, и случайной фазой $\varphi(t, i, j) = \varphi_0(t, i, j) + \varepsilon(t, i, j)$, которая разделяется на составляющую φ_0 , связанную с отражением сигнала от объекта или поверхности, и случайную составляющую ε , равномерно распределенную на промежутке времени селекции по дальности; $\gamma_{qk}(i, j)$ – известный фазовый сдвиг при приеме отраженного сигнала с i, j -го углового направления q, k -м приемным элементом по отношению к фазовому центру АР; $\dot{p}_{qk}(t, i, j) = \xi_{qk}(t, i, j) + i\eta_{qk}(t, i, j)$ – помеха типа комплексного белого шума, действительная и мнимая часть которого распределены по нормальному закону: $\xi, \eta \in N(0, \sigma_p^2)$.

Модель (4) преобразуется к виду

$$\begin{aligned} \dot{s}_{qk}(t, i, j) &= \\ &= \sum_{i_1=-m}^m \sum_{j_1=-n}^n \dot{\alpha}_{qk}(i_1, j_1) \cdot \dot{x}(t, i+i_1, j+j_1) + \dot{p}_{qk}(t, i, j) \quad (5) \\ \dot{\alpha}_{qk}(i, j) &= a_{qk}(i, j) e^{i(\theta_{qk}(i, j) - \gamma_{qk}(i, j))}, \\ \dot{x}(t, i, j) &= U(t, i, j) e^{-i\varphi(t, i, j)}, \end{aligned}$$

где $\dot{x}(t, i, j)$ – комплексный сигнал, подлежащий оцениванию, модулем которого является искомая амплитуда сигнала отражения $U(t, i, j)$; $\dot{\alpha}_{qk}(i, j)$ – комплексные коэффициенты, описывающие свойство q, k -го канала.

Матрично-векторная форма (5):

$$Y = A \cdot X + P, \quad (6)$$

где Y – QK-вектор-столбец комплексных измерений $\dot{s}_{qk}(t, i, j)$, взятых по совокупности q, k при i, j -м положении антенны ($q = \overline{1, Q}, k = \overline{1, K}$); A – QKxMN – матрица комплексных коэффициентов $\dot{\alpha}_{qk}(i, j)$; X – MN – вектор-столбец искомых комплексных параметров поля отражения $\dot{x}(t, i+i_1, j+j_1)$, взятых построчно по i_1, j_1 ($i_1 = \overline{-m, m}, j_1 = \overline{-n, n}$); P – QK – вектор-столбец комплексных помех.

Задача с позиции модели (6) заключается в поиске наилучших в определенном смысле оценок составляю-

щих \dot{x} вектора X (восстановлении X), модуль которых дает оценки искомых амплитуд $U(t, i+i_1, j+j_1)$ поля отражения в i_1, j_1 -х элементах дискретизации. Оптимальные оценки вектора X при отсутствии статистической информации относительно X и P находятся по критерию минимума квадрата евклидовой нормы

$$\|Y - AX\|^2 = (Y - AX)^{*T} \cdot (Y - AX), \quad (7)$$

где $*T$ – символ комплексного сопряжения и транспонирования, с учетом процедур регуляризации [5].

В качестве оценок амплитуд поля отражения берутся модули элементов вектора X , которые построчно располагаются в составе $(2m+1) \times (2n+1)$ -матрицы $\hat{U}(i, j)$ с элементами $\hat{u}(i_1, j_1), i_1 = \overline{-m, m}, j_1 = \overline{-n, n}$. Матрица $\hat{U}(i, j)$ представляет восстановленное в пределах ширины ДНА при i, j -м положении антенны амплитудное изображение наземной или воздушной обстановки с повышенной в несколько раз разрешающей способностью по углам. На множестве i, j -х положений антенны, смещенных относительно друг друга на ширину ДН, операции повторяются. Полученные матрицы $\hat{U}(i, j)$ помещаются в состав блочной матрицы \hat{U} , представляющей восстановленное амплитудное изображение обстановки в зоне обзора РЛС.

При сканировании антенны с шагом, меньшим ширины ДНА, используется соответственно меньшее число элементов вектора оценок X , угловые координаты которых находятся ближе к фазовому центру антенны. Точность оценивания при этом увеличивается (за счет выбора центральных элементов), а быстродействие алгоритма восстановления РИ уменьшается (из-за увеличения числа шагов). При сканировании с шагом, равным элементу дискретизации по угловым координатам, выражение (5) можно рассматривать как свертку и представить (5) в частотной области (n_1, n_2) в виде алгебраического уравнения относительно неизвестного X [6]:

$$Y(n_1, n_2) = A(n_1, n_2) \cdot X(n_1, n_2) + P(n_1, n_2),$$

где Y, A, X и P – образы двумерного дискретного преобразования Фурье в данном канале. После определения X осуществляется обратный переход в пространственную область.

Если аппроксимировать коэффициенты ДНА в виде функции, разделяющейся по переменным: $\dot{\alpha}_{qk}(i, j) = \dot{\alpha}_q(i) \dot{b}_k(j)$, то вместо (5) получается

$$\begin{aligned} \dot{s}_{qk}(t, i, j) &= \\ &= \sum_{i_1=-m}^m \dot{\alpha}_q(i_1) \sum_{j_1=-n}^n \dot{x}(t, i+i_1, j+j_1) \cdot \dot{b}_k(j_1) + \dot{p}_{qk}(t, i, j) \quad (8) \end{aligned}$$

что позволяет представить совокупность измерений (8), полученных в QK каналах ($q = \overline{1, Q}, k = \overline{1, K}$) при i, j -м положении антенны, в матричной форме:

$$Y = A \cdot X \cdot B + P, \quad (9)$$

где Y – QxK-матрица q, k -х измерений $\dot{s}_{qk}(t, i, j)$, распо-

ложенных в q -х строках и k -х столбцах; A – $Q \times M$ -матрица q , i -х коэффициентов $\hat{a}_q(i_1)$; X – $M \times N$ -матрица i_1, j_1 -х искомым параметров поля отражения $\hat{x}(t, i + i_1, j + j_1)$; B – $N \times K$ -матрица j_1, k -х коэффициентов $\hat{b}_k(j_1)$; P – $Q \times K$ -матрица q, k -х помех $\hat{p}_{qk}(t, i, j)$.

Поиск оптимальной оценки X искомой матрицы X подчиняется условию, аналогичному минимуму (7):

$$\begin{aligned} \text{tr}[F(\hat{X})] &= \text{tr}[(Y - A\hat{X}B)^{*T} \times (Y - A\hat{X}B)] = \\ &= \text{tr}[(Y - \hat{Y})^{*T} \cdot (Y - \hat{Y})] = \text{tr}[\Delta Y^{*T} \cdot \Delta Y] \rightarrow \min_{\hat{X}} \end{aligned} \quad (10)$$

где $\text{tr}[F]$ – след матрицы F ; $F = F(\Delta \hat{Y}(\hat{X}))$ – $K \times K$ – матричная сложная функция \hat{X} . Матрица $\Delta Y = Y - \hat{Y}$ в (10), зависящая от \hat{X} , представляет отклонения измерений Y относительно оценок измерений $\hat{Y} = A\hat{X}B$, восстановленных на основе \hat{X} .

След матрицы F равен сумме квадратов отклонения измерений всех каналов от их восстановленных значений. Модели (6), (9) применимы как в активных РЛС, так и в пассивных сканирующих многоканальных РТЛС. Матричная форма позволяет значительно уменьшить количество вычислительных операций при формировании и обращении матриц по сравнению с векторной формой [5].

На рис. 2а дано изображение участка поверхности, получаемое при сканировании на ширину ДНА. На рис. 2б – изображение при сканировании со смещением на один элемент дискретизации (смазывание изображения). На рис. 2в – восстановленное изображение с помощью алгоритма.

Совокупность двумерных изображений, полученных в координатах угол места – азимут в различных t -х элементах разрешения дальности, образует трехмерное РЛ-изображение.

Формирование трехмерных изображений в РТЛС

В пассивных бортовых РТЛС радиолокационного диапазона проблема повышения разрешающей способ-

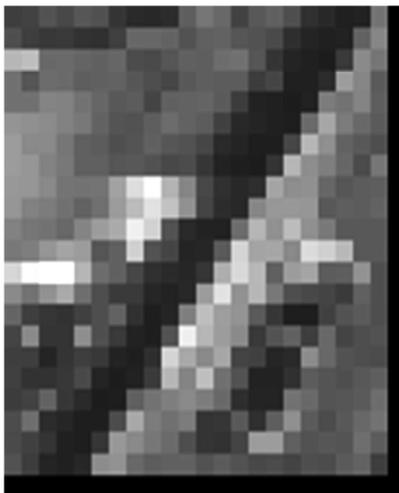
ности по угловым координатам стоит острее, чем в РЛС. Кроме того, отсутствие измерений дальности не позволяет получить трехмерное изображение при одном положении антенны. Требуется последовательность наблюдений, полученных при облете контролируемого участка поверхности, либо наличие нескольких антенн, разнесенных в пространстве (позиционирование).

В отличие от РЛС в РТЛС двумерное изображение в координатах «угол места–азимут» получается усреднением по времени наблюдения при приеме излученного сигнала. Система наблюдения представляет собой бортовую РТЛС, работающую в миллиметровом или сантиметровом диапазонах длин волн [7], совмещенную с бортовым компьютером и навигационными датчиками. Антенна РТЛС в общем случае выполнена в виде АР. Положение антенны в момент времени t_1 рассматривается 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 перпендикулярны плоскости антенны (рис.3).

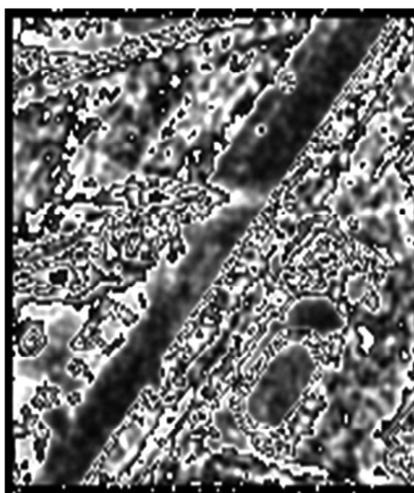
При движении объекта носителя РТЛС на промежутке $[t_1, t_2]$ осуществляется поворот осей O_1X_1, O_1Y_1 и O_1Z_1 на углы α, β, γ (тангаж, крен, курс), а точка O_1 получает приращения параллельного переноса $\Delta x, \Delta y, \Delta z$. Величины α, β, γ и $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ измеряются с помощью бортовой навигатора.

Рассматривается геометрический подход [8] к измерению наклонной дальности до элементов поверхности с помощью движущейся по траектории облета контролируемого участка поверхности РТЛС. Пусть в момент времени t_1 из точки O_1 центра антенны в сторону точки A , расположенной на поверхности (рис.3), направлен i, j -й луч, положение которого определяется углом места θ_i , отсчитываемым от плоскости $O_1X_1Z_1$, и азимутом φ_i , отсчитываемым от оси O_1Z_1 . По этому лучу идет в направлении антенны i, j -я составляющая $\dot{u}(t_1, i, j)$ излучаемого сигнала. Строится единичный вектор \bar{a}_1 – орт вектора O_1A , направленный по лучу к точке A , его координаты в прямоугольной системе $O_1X_1Y_1Z_1$:

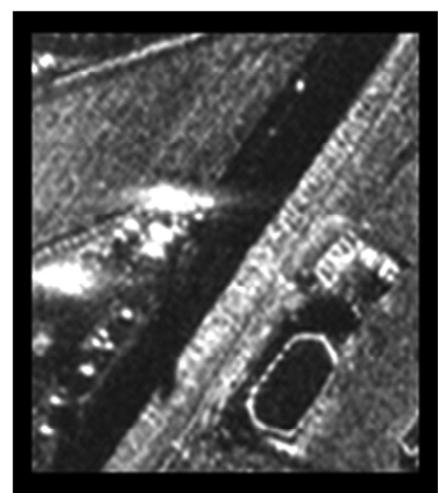
$$\bar{a}_1 = (x_1, y_1, z_1) = (\cos \theta_1 \sin \varphi_1, \sin \theta_1, \cos \theta_1 \cos \varphi_1).$$



а)



б)



в)

Рис. 2. Восстановление изображения участка поверхности

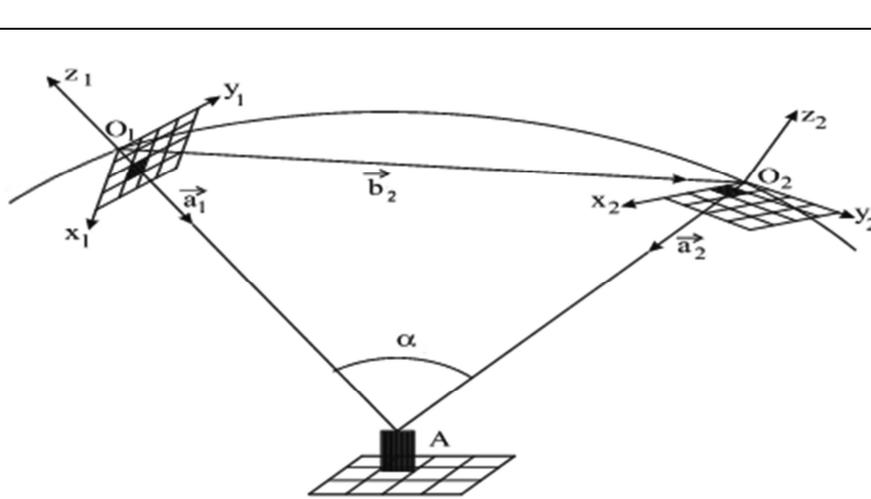


Рис.3. Наблюдение объекта в РТЛС

Пересчитываются координаты вектора \vec{a}_1 в систему координат $O_2X_2Y_2Z_2$ на момент времени t_2 в соответствии с формулами поворота осей и параллельного переноса, полагая для свободных векторов приращения параллельного переноса равными нулю: $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 0$. Получается вектор $\vec{a}'_1 = (x'_2, y'_2, z'_2)$. В текущий момент t_2 в системе координат $O_2X_2Y_2Z_2$ строится вектор \vec{a}_2 – орт вектора O_2A , направленный к той же точке A на поверхности по i', j' -му лучу:

$$\vec{a}_2 = (x_2, y_2, z_2) = (\cos \theta_2 \sin \varphi_2, \sin \theta_2, \cos \theta_2 \cos \varphi_2).$$

В системе координат $O_2X_2Y_2Z_2$ рассматриваются три вектора: \vec{a}'_1 , \vec{a}_2 и вектор параллельного переноса $\vec{b}_2 = \vec{O_1O_2} = (-\Delta x, -\Delta y, -\Delta z)$. Если измерения координат векторов выполнены без ошибок, то три вектора \vec{a}'_1 , \vec{a}_2 и \vec{b}_2 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 оценки дальности $R_1(i, j)$ и $R_2(i', j')$ для соответствующих положений i, j -го и i', j' -го лучей в моменты времени t_1 и t_2 .

Для повышения точности измерения дальности используется второй подход. В каждый текущий момент времени t_μ по данным навигационной системы определяется оценка высоты наблюдателя $\hat{z}(t_\mu)$ в момент t_μ .

По известному вектору нормали к поверхности \vec{n}_μ определяется оценка дальности R_μ с помощью модуля скалярного произведения $(\vec{a}_\mu, \vec{n}_\mu)$ векторов \vec{a}_μ, \vec{n}_μ .

Алгоритм формирования трехмерного РТЛС сводится к следующему.

1. В дискретные моменты времени $t_\mu, \mu=0,1,2,\dots,L$, формируются двумерные амплитудные изображения $\hat{U}(t_\mu, i, j)$ в координатах угол места – азимут аналогично радиолокационным изображениям в режиме РЛ.

2. Координаты x_l, y_l центра каждого i, j -го элемента матрицы $\hat{U}(t_{\mu-1}, i, j)$, $\mu=0,1,2,\dots,L$, пересчитываются в

x'_2, y'_2 на основе навигационных данных 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. Иначе фиксируется непопадание i', j' .

4. Корреляционно-экстремальным методом, например, [9], 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 матрицы $\hat{U}(t_{\mu-1}, i, j)$ устанавливаются координаты векторов $\vec{a}'_{\mu-1}, \vec{a}_\mu, \vec{b}_\mu$ и определяются оценки дальности $R_\mu(i, j)$. Одновременно с помощью оценки $\hat{z}(t_\mu)$, имеющей смысл высоты объекта-носителя РТЛС вновь вычисляется оценка дальности $R_\mu(i, j)$.

6. Операции п.п.2 – 5 повторяются в последовательности моментов $t_\mu, \mu = \overline{1, L}$. Найденные значения амплитуд $\hat{U}(t_\mu, i, j)$, дальностей $R_\mu(i, j)$ и запомненные значения углов места $\theta_\mu(i, j)$ положения i, j -го луча усредняются во времени t_μ . В результате к моменту t_L формируются усредненные матрицы U, R, Θ с элементами $\tilde{U}(i, j), R(i, j), \tilde{\theta}(i, j)$.

7. В момент t_L заполняется матрица H усредненных высот рельефа и объектов на поверхности, элементы $\tilde{h}(i, j)$ которой вычисляются по формуле:

$$\tilde{h}(i, j) = \hat{z}(t_L) - R(i, j) \sin \tilde{\theta}(i, j),$$

где $\hat{z}(t_L)$ – оценка высоты объекта-носителя РТЛС на момент t_L .

8. Найденные матрицы U и H представляют трехмерное изображение, которое с помощью алгоритмов отображения выводится на экран.

Подобный подход к формированию трехмерного изображения в РТЛС может быть использован и в оптико-электронных системах как альтернативный, если в них возникают проблемы с установкой внутренних параметров камеры (калибровкой).

Заключение

Предложены методы и алгоритмы формирования трехмерных изображений по данным наблюдения бортовой РЛС и РТЛС. Возможно комплексирование РЛС и РТЛС при получении изображений объектов [10]. Учет высоты поверхности и объектов на поверхности в системах автоматического распознавания позволяет увеличить вероятность обнаружения и распознавания высотных объектов. Результаты математического моделирования показывают, что наличие матрицы высот позволяет распознавать изображения высотных объектов с достоверностью 0,85 - 0,95 даже в тех случаях, когда решающая способность системы наблюдения существенно ухудшается. Предложенные методы и алгоритмы могут найти применение при разработке систем распознавания для беспилотных ЛА.

Работа производилась при поддержке Министерства образования и науки РФ (ГК № 16.740.11.0519).

Литература

1. Клочко В.К. Суперразрешение в системах наблюдения с антенной решеткой при синтезе изображения земной поверхности // Автометрия. 2011. № 1. С. 50 – 55.
2. Математические методы восстановления и обработки изображений в радиотеплооптоэлектронных системах / В.К. Клочко. Рязань: РГРТУ, 2009.
3. Кондратенков Г.С., Фролов А.Ю. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли. Учебное пособие для вузов / Под ред. Г.С. Кондратенкова. М.: «Радиотехника», 2005. 368 с.
4. Клочко В.К. Методы формирования трехмерных изображений поверхности в бортовых системах радиовидения // Автометрия. 2009. № 1. С. 23 - 33.

5. Клочко В.К. Восстановление радиоизображений в многоканальных сканирующих РЛС // Цифровая обработка сигналов. 2010. № 1. С. 27 – 30.

6. Клочко В.К. Алгоритм двухэтапного восстановления радиолокационных изображений // Автометрия. 2009. № 5. С. 34 - 39.

7. Пирогов Ю.А., Тимановский А.Л. Суперразрешение в системах пассивного радиовидения миллиметрового диапазона // Радиотехника. 2006 № 3. С. 14 – 19.

8. Клочко В.К. Пространственно-временная обработка изображений поверхности Земли в бортовых радиотеплолокационных станциях // Радиотехника. 2010. № 1. С. 3 – 10.

9. Баклицкий В.К., Юрьев А.Н. Корреляционно-экстремальные методы навигации. М.: Радио и связь, 1982. 256 с.

10. Клочко В.К. Алгоритм комплексирования РТЛС и РЛС при получении изображений объектов // Изв. вузов. Радиоэлектроника. 2009. № 8. С. 74 – 78.

MATHEMATICAL METHODS OF FORMATION THREE-DIMENSIONAL IMAGES OF OBJECTS IN ONBOARD SYSTEMS OF VISION

Klochko V.K.

Methods and algorithm of formation of the three-dimensional images of a terrestrial surface and objects on a surface according to supervision data of onboard radar location station (RLS) and radar thermal location station (RTLS) are offered. For RLS modification of a Doppler filtration method is given at formation of spatial elements of permit, and methods of increase of RLS resolution on angular coordinates in a mode of an actual beam are developed. For RTLS the algorithm of formation of the three-dimensional image of objects on a surface at flight by RTLS carrier of a controllable site of a surface is given.

Уважаемые коллеги!

Для тех, кто не успел оформить подписку на первое полугодие 2012 года через ОАО «Роспечать», сохраняется возможность приобретения журналов непосредственно в редакции по адресу:
107031, г. Москва, Рождественка, 6/9\20, стр. 1,
Российское научно-техническое общество радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова, или оформить заказ в соответствии с требованиями, выставленными на сайте журнала: www.dsps.ru.

Справки по телефонам: (495) 621-71-08, 621-06-10.

Факс: (495) 621-16-39. E-mail: rntores@mail.ru