

УДК 621.396

Алгоритмы обнаружения объектов, измерения дальности и перемещений объектов в системе нескольких радиометров

Клочко Владимир Константинович

доктор технических наук, профессор Рязанского государственного радиотехнического университета.

Гудков Сергей Михайлович

аспирант Рязанского государственного радиотехнического университета.

E-mail: klochkovk@mail.ru.

Адрес: 390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

Аннотация: В распределённых системах дистанционного зондирования Земли и наблюдения за наземными объектами посредством пассивного радиовидения миллиметрового диапазона, возникает необходимость измерения дальности до обнаруженных объектов, установления факта перемещения объектов и их сопровождения. В работе предложен геометрический подход к измерению дальности до обнаруженных объектов и их перемещений по результатам наблюдений нескольких пространственно распределённых радиометров. Описываются алгоритмы обнаружения объектов, измерения дальности и построения векторов перемещений объектов. Необходимым условием работы алгоритмов является классификация наблюдаемых изображений в системе нескольких радиометров по их принадлежности тем или иным объектам с оценением количества таких объектов. Предложен подход к оптимальной классификации наблюдений и дана упрощающая вычислительная процедура последовательного выбора вариантов для его реализации. По результатам классификации наблюдения, отнесённые к обнаруженным объектам, передаются на алгоритмы, которые измеряют дальность до каждого объекта. Измеренные дальности используются далее в алгоритме определения перемещений объектов на основе наблюдений за объектами во времени.

Ключевые слова: пассивное радиовидение, распределённая система, радиометр, миллиметровый диапазон радиоволн, измерение дальности, вектор перемещения.

Введение

Пассивные системы дистанционного зондирования Земли и наблюдения за наземными объектами посредством радиовидения миллиметрового диапазона длин волн [1] используются наряду с активными системами [2] и обладают преимуществом скрытности. В работе рассматривается система, состоящая из нескольких пространственно распределённых сканирующих радиометров или радиометров с антенной решёткой [3, 4]. Такая система применяется для обнаружения наземных объектов по их тепловому контрасту на фоне местности, а также сопровождения обнаруженных объектов. Дальность до обнаруженных объектов можно измерить с помощью лазерного дальномера, однако это нарушает скрытность системы. Существуют оптико-электронные системы измерения дальности, действующие по принципу стереопары [5], но они зависимы от погодных условий, времени суток и поэтому не всегда

применимы. В связи с этим актуальна разработка методов и алгоритмов измерения дальности до обнаруженных объектов и их перемещений на земной поверхности на основе радиометрических наблюдений. Измерению дальности предшествует решение задачи классификации изображений по их принадлежности объектам и, как следствие, обнаружение объектов.

Целью работы является разработка алгоритмов обнаружения объектов на основе классификации наблюдений, а также измерения дальности и векторов перемещений объектов на земной поверхности в системе нескольких радиометров дистанционного зондирования.

Постановка задачи и критерий оптимальной классификации

Система из n пространственно распределённых радиометров сканирует один и тот же участок земной поверхности, наблюдая объекты на по-

верхности под разными углами. Это эквивалентно наблюдению за объектами при движении носителя радиометра по определённой траектории или по орбите с n -кратным съёмом данных. Каждый объект имеет электромагнитное поле. Излучение принимается антенной радиометра в миллиметровом диапазоне длин волн, проходит тракт первичной обработки и преобразуется в радиотепловое изображение (РТИ) $T = \{t(k_1, k_2)\}$ в целочисленных координатах k_1, k_2 местной системы координат: $k_1, k_2 \in D$, где D – область объекта в матрице РТИ радиометра. Дополнительно матрица РТИ может обрабатываться алгоритмами восстановления изображений [6 – 8] с целью повышения разрешения (чёткости) РТИ и тогда область D имеет более чёткие границы.

Радиояростное температурное изображение каждого объекта в матрице РТИ в общем случае неоднородное и область D объекта может распадаться на несколько однородных по яркости подобластей $G \subset D$ (сегментов-фрагментов). Каждая такая i -я подобласть $G_{i,j}$ выделяется в матрице РТИ j -го радиометра оператором вручную или с помощью операций сегментации [9] в автоматическом режиме.

Обозначим: m_j – количество сегментов в j -й матрице; $V(i, j) = (x_k(i, j), k = \overline{1, L})$ – вектор параметров i -го сегмента в j -й матрице; $x_k(i, j)$ – k -й элемент вектора: x_1, x_2, x_3 – координаты орта направления на центр сегмента, определяемые на основе измеряемых угловых координат центра; x_4 – амплитуда (температурная характеристика сегмента); x_5 – площадь сегмента в количестве пикселей изображения (возможны другие геометрические характеристики); L – количество параметров; $\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_n$ – множества векторов в матрицах РТИ: $\Omega_j = \{V(i, j), i = \overline{1, m_j}\}$; M – количество искомым объектов ($M \leq m_j, j = \overline{1, n}$).

Требуется классифицировать элементы множеств $\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_n$ по их принадлежности

тем или иным сегментам. То есть из множеств $\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_n$ следует выбрать m непересекающихся ρ -х групп векторов $V(i_{j,\rho}, j)$, $j = \overline{1, n}$, $i_{j,\rho} \in \{1, 2, \dots, m_j\}$, $\rho = 1, 2, \dots, m$, взятых по одному из каждого множества Ω_j , $j = \overline{1, n}$, которые наиболее правдоподобно соответствуют одним и тем же сегментам РТИ объектов. Сегменты, прошедшие классификацию и имеющие близкие центры, считаются принадлежащими одному объекту.

Необходимым условием классификации является пересчёт координат ортов векторов направления на центры сегментов в единую прямоугольную систему координат центрального радиометра. После пересчёта координат ортов выполняются операции классификации.

Формирование ρ -х групп элементов множеств Ω_n , $j = \overline{1, n}$, целесообразно подчинить критерию близости выбранных элементов к центру каждой группы в квадратичном смысле. Центр ρ -й группы рассматривается как точка в L -мерном пространстве параметров. Критерий правдоподобия при известном количестве m групп носит суммарный характер и подобен критерию метода наименьших квадратов с весами:

$$I = \sum_{\rho} \sum_j^n \sum_k^L \mu_k (x_k(i_{j,\rho}, j) - \bar{x}_k(\rho))^2 \rightarrow \min, \quad (1)$$

$$i_{j,\rho} \in \{1, 2, \dots, m_j\},$$

где $\mu_k > 0$ – весовой коэффициент степени важности k -го параметра, выбираемый эмпирически; $x_k(i_{j,\rho}, j)$ – k -й элемент вектора $V(i_{j,\rho}, j)$, отнесённого к ρ -й группе в j -м множестве Ω_j ; $\bar{x}_k(\rho)$ – среднее значение k -го параметра ρ -й группы, вычисляемое по формуле:

$$\bar{x}_k(\rho) = (1/n) \sum_{j=1}^n x_k(i_{j,\rho}, j).$$

В соответствии с (1) элементы множеств Ω_j , $j = \overline{1, n}$ (векторы), взятые по одному из каждого множества $\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_n$, распределяются по m непересекающимся группам так, чтобы

суммарный показатель I принял наименьшее значение.

Принципиально выбор оптимального решения при малых значениях m, n с позиции критерия (1) осуществляется перебором m непересекающихся вариантов из $N = m_1 \cdot m_2 \cdot \dots \cdot m_n$ вариантов. Каждый такой g -й вариант ($g = \overline{1, N}$) представляет комбинацию номеров $i_{1,g}, i_{2,g}, \dots, i_{n,g}$ элементов множеств $\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_n$, которые запоминаются в массивах номеров $Ni(j, g), j = \overline{1, n}, g = \overline{1, N}: i_{1,g} = Ni(1, g), i_{2,g} = Ni(2, g), \dots, i_{n,g} = Ni(n, g)$. Показатели g -х комбинаций вычисляются по формуле

$$I(g) = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^L \mu_k(x_k(i_{j,g}, j) - \bar{x}_k(g))^2, \quad g = \overline{1, N},$$

и запоминаются в массиве $I(g)$. Затем из N вариантов комбинаций перебором выбираются m непересекающихся вариантов с наименьшим показателем $I = I(g_1) + I(g_2) + \dots + I(g_m)$.

Последовательный выбор вариантов

Упрощенная процедура выбора m непересекающихся вариантов из N с наименьшим значением показателя (1) сводится к последовательному выбору.

1. Вначале выбирается g_1 -й вариант $i_{1,g_1}, i_{2,g_1}, \dots, i_{n,g_1}$ с наименьшим значением показателя $I(g_1), g_1 \in \{1, 2, \dots, N\}$.

2. Из оставшихся комбинаций исключаются те, номера элементов которых совпадают с номерами элементов g_1 -го варианта. Это осуществляется присвоением меток соответствующим элементам массива $Ni(j, g)$. Допускается минимальное количество π одинаковых номеров (например, $\pi = 1$).

3. Затем выбирается g_2 -й вариант с наименьшим значением показателя $I(g_2), g_2 \in \{1, 2, \dots, N\}, g_2 \neq g_1$. И так далее по этой схеме выбираются m комбинаций.

При неизвестном числе m процедура последовательного выбора оказывается наиболее удачной. Последний вариант, который получа-

ется при последовательном исключении выбранных вариантов, даёт оценку числа m .

Критерий оптимальной классификации в этом случае принимает вид:

$$I(g_\rho) = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^L \mu_k(x_k(i_{j,g_\rho}, j) - \bar{x}_k(g_\rho))^2 \rightarrow \min, \\ \rho = 1, 2, \dots, m. \quad (2)$$

Устанавливается приближенная связь критериев (1) и (2): $I \approx \sum_{\rho=1}^m I(g_\rho)$.

Для больших значений N целесообразно организовать направленный перебор вариантов при минимизации (2) с отсечением заведомо ложных вариантов. Для этого воспользуемся рекуррентными соотношениями [6]:

$$\bar{x}_k(j, g) = \bar{x}_k(j-1, g) + (1/j)(x_k(i_{j,g}, j) - \bar{x}_k(j-1, g)), \\ j = 2, \dots, n, \quad (3)$$

$$I(j, g) = I(j-1, g) + \frac{j-1}{j} \sum_{k=1}^L \mu_k(x_k(i_{j,g}, j) - \bar{x}_k(j-1, g))^2 \quad (4)$$

при начальном условии $\bar{x}_k(1, g) = x_k(i_{j,g}, 1), k = \overline{1, L}, I(1, g) = 0$.

Алгоритм последовательного выбора вариантов

Алгоритмы последовательного выбора с отсечением ложных вариантов при траекторной обработке подробно изложены в [8]. Модифицированный вариант подобных алгоритмов применительно к системе радиометров сводится к следующему.

1. Предварительно на основе измеренных угловых координат центров сегментов найдутся орты векторов направлений на центры. Координаты ортов пересчитываются в прямоугольную систему координат центрального радиометра.

2. На первом шаге $j = 1$ рассматривается множество Ω_1 . Каждый i -й элемент ($i = \overline{1, m_1}$) этого множества даёт начало i -й группы, для неё устанавливаем начальные значения показателя правдоподобия и оценок параметров:

$$I(i) = 0, \quad \bar{x}_k(i) = x_k(i, 1), \quad k = \overline{1, L}, \quad i = \overline{1, m_1}.$$

Номера i -х элементов запоминаются в массиве $Ni(1, i) = i$, $i = \overline{1, N_1}$, $N_1 = m_1$.

Замечание. Целесообразно в качестве Ω_1 брать множество с наибольшим количеством элементов m_1 и далее рассматривать Ω_j в порядке убывания m_j .

3. Для последующих множеств Ω_j ($j = 2, 3, \dots, n$) выполняются следующие операции.

3.1. Каждой ρ -й группе ($\rho = \overline{1, N_{j-1}}$), полученной на предыдущем ($j - 1$)-м шаге, ставятся в соответствие i -е элементы множества Ω_j ($i = \overline{1, m_j}$). Выбору подлежат лишь те элементы, координаты центра которых $x_1(i, j)$, $x_2(i, j)$ удовлетворяет условию:

$$\sqrt{(x_1(i, j) - \bar{x}_1(\rho))^2 + (x_2(i, j) - \bar{x}_2(\rho))^2} \leq \Delta,$$

где Δ – допустимое удаление центра i -го элемента относительно центра ρ -й группы.

Для таких i -х элементов вычисляется показатель правдоподобия в соответствии с (4):

$$I_i = I(\rho) + ((j - 1) / j) \sum_{k=1}^L \mu_k (x_k(i, j) - \bar{x}_k(\rho))^2.$$

3.2. Показатель I_i сравниваем с порогом α_j . Если $I_i \leq \alpha_j$, то i -й элемент множества Ω_j присоединяется к ρ -й группе и она получает своё продолжение с новым порядковым номером g на j -м шаге ($g = 1, 2, \dots$). Для g -й группы запоминается показатель $I(g) = I_i$ и уточняются оценки параметров в соответствии с (3):

$$\bar{x}_k(g) = \bar{x}_k(\rho) + (1 / j)(x_k(i, j) - \bar{x}_k(\rho)), \quad k = \overline{1, L}.$$

Запоминается номер присоединённого элемента: $Ni(j, g) = i$.

3.3. Если к ρ -й группе, полученной на предыдущем ($j - 1$)-м шаге, не присоединён ни один из элементов множества Ω_j , то эта группа считается неперспективной и не получает дальнейшего продолжения.

3.4. Оставшиеся элементы множества Ω_j , не отнесённые к ρ -м группам, дают начало новым g -м группам с начальными значениями показателя правдоподобия и оценок параметров.

3.5. После выполнения операций п.п. 3.1 – 3.4 сформировано N_j наиболее перспективных групп. Запомнены оценки параметров $\bar{x}_k(g)$, $k = \overline{1, L}$, показатели правдоподобия $I(g)$ и номера присоединённых элементов $Ni(j, g)$.

4. На последнем шаге $j = n$ после выполнения операций раздела 2 последовательно выделяются m наилучших непересекающихся ρ -х групп с допустимым количеством присоединённых элементов в порядке увеличения показателей $I(g_1), I(g_2), \dots, I(g_m)$ по схеме, изложенной ранее.

5. Номера элементов $i_{1,\rho}, i_{2,\rho}, \dots, i_{n,\rho}$, $\rho = \overline{1, m}$, выделенных групп передаются на алгоритм объединения сегментов.

Алгоритм объединения сегментов

Данный алгоритм выполняет операции кластеризации [10] – классифицирует m групп по M классам ($M \leq m$) с близкими координатами центров. Процедура кластеризации может быть следующей.

1. Выделенная первым алгоритмом классификации g_1 -я группа с наименьшим показателем $I(g_1)$ образует начало 1-го кластера с центром g_1 -й группы. Среди остальных групп выбирается в порядке увеличения показателя группа, центр которой удалён относительно центра 1-го кластера на меньшую величину, которая не превышает порога Δ . Координаты центра присоединённой группы усредняются с координатами центра 1-го кластера. Тем самым корректируется центр. Номера элементов присоединённых групп исключаются из дальнейшего рассмотрения. По такому принципу рассматриваются все ещё не присоединённые к 1-му кластеру группы. Формирование кластера заканчивается, когда больше нет групп, удовлетворяющих порогу Δ .

2. Среди оставшихся групп выбирается группа с наименьшим показателем, она образует начало 2-го кластера. К этому кластеру присоединяются другие группы по указанному

выше правилу. Формирование M кластеров ($M \leq m$) заканчивается при пустом множестве оставшихся групп. Число M является оценкой числа изображений, “подозрительных” на принадлежность объектам и подлежащих дальнейшему распознаванию.

3. Координаты центров M сформированных кластеров передаются на алгоритмы измерения расстояний до предполагаемых объектов и их перемещений.

Алгоритм измерения расстояния до объектов

Для измерения расстояния до отдельного объекта требуется минимальное количество двух радиометров с большой базой – расстоянием между радиометрами. Пусть для данного объекта выбраны два радиометра с наибольшей базой.

Положение антенны 1-го радиометра рассматривается в его прямоугольной системе координат $O_1X_1Y_1Z_1$, а 2-го радиометра – в системе $O_2X_2Y_2Z_2$. Оси O_1Z_1 и O_2Z_2 перпендикулярны к плоскости антенны. Из точки O_1 центра антенны 1-го радиометра в сторону точки A – центра объекта направим луч, положение которого определено углом места θ_1 , отсчитываемого от плоскости $O_1X_1Z_1$, и азимутом ϕ_1 , отсчитываемым от оси O_1Z_1 в плоскости $O_1X_1Z_1$. Значения углов θ_1 и ϕ_1 определены положением точки A в матрице РТИ радиометра. Для измерения дальности выполняются следующие построения.

1. Строится орт \vec{a}_1 вектора $\vec{O_1A}$, его координаты в прямоугольной системе 1-го радиометра:

$$\vec{a}_1 = (x_1, y_1, z_1) = (\cos\theta_1 \sin\phi_1, \sin\theta_1, \cos\theta_1 \cos\phi_1). \quad (5)$$

2. Координаты вектора \vec{a}_1 пересчитываются в систему координат 2-го радиометра в соответствии с формулами поворота осей (приращения параллельного переноса для свободных векторов полагаем равными нулю):

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} x'_2 \\ y'_2 \\ z'_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha_0 & \sin\alpha_0 \\ 0 & -\sin\alpha_0 & \cos\alpha_0 \end{bmatrix} \times \\ &\times \begin{bmatrix} \cos\beta_0 & 0 & \sin\beta_0 \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\beta_0 & 0 & \cos\beta_0 \end{bmatrix} \times \\ &\times \begin{bmatrix} \cos\gamma_0 & \sin\gamma_0 & 0 \\ -\sin\gamma_0 & \cos\gamma_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (6)$$

где $\alpha_0, \beta_0, \gamma_0$ – углы Эйлера поворота осей, установленные навигационной системой. Получается вектор $\vec{a}'_1 = (x'_2, y'_2, z'_2)$.

3. В системе координат 2-го радиометра строится орт \vec{a}_2 вектора $\vec{O_2A}$, направленный к той же точке A :

$$\vec{a}_2 = (x_2, y_2, z_2) = (\cos\theta_2 \sin\phi_2, \sin\theta_2, \cos\theta_2 \cos\phi_2).$$

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

4. С помощью скалярного произведения векторов находятся косинусы внутренних углов треугольника α, β, γ ($\gamma = \pi - \alpha - \beta$), и по теореме синусов определяются оценки дальности:

$$\begin{aligned} \cos\alpha &= |(\vec{a}'_1, \vec{a}_2)|, \quad \cos\beta = |(\vec{b}, \vec{a}'_1)| / |\vec{b}|, \\ \frac{|\vec{b}|}{\sin\alpha} &= \frac{R_2}{\sin\beta} = \frac{R_1}{\sin(\alpha + \beta)}, \end{aligned}$$

$$R_1 = |\vec{b}| \sin(\alpha + \beta) / \sin\alpha, \quad R_2 = |\vec{b}| \sin\beta / \sin\alpha. \quad (7)$$

При малых значениях α решение (7) может быть неустойчивым, поэтому оценки дальности следует находить при достаточно больших базах $|\vec{b}|$.

5. Расчёты повторяются для всех пар радиометров при наблюдении точки A из разных положений. В результате измеряются дальности

сти до объекта A от каждого радиометра. Аналогично измеряются дальности до остальных объектов (до их центров B, C, \dots).

Алгоритм построения векторов перемещений объектов

Движущиеся объекты наблюдения перемещаются по определённым траекториям. Каждый объект занимает положения M_1, M_2, \dots, M_K на земной поверхности в k -е моменты времени t_k , $k = \overline{1, K}$. Требуется при известном начальном положении M_1 определить векторы $\overline{M_1M_2}$, $\overline{M_2M_3}, \dots, \overline{M_{K-1}M_K}$ перемещений объекта, необходимые для его автосопровождения [6].

1. В момент времени t_1 с помощью двух радиометров измеряется расстояние $R_1 = |\overline{O_1M_1}|$ от 1-го радиометра до объекта и в системе координат 1-го радиометра вычисляются координаты орта \vec{a}_1 вектора $\overline{O_1M_1}$ по формуле (5):

$$\vec{a}_1 = (x_1, y_1, z_1) = (\cos \theta_1 \sin \phi_1, \sin \theta_1, \cos \theta_1 \cos \phi_1).$$

2. Координаты вектора \vec{a}_1 пересчитываются в систему координат 2-го радиометра по формуле (6). Получается вектор $\vec{a}'_1 = (x'_1, y'_1, z'_1)$. Также составляется базовый вектор $\vec{b} = \overline{O_1O_2} = (\Delta x, \Delta y, \Delta z)$.

3. В момент времени t_2 с помощью тех же двух радиометров измеряется расстояние $R_2 = |\overline{O_2M_2}|$ и в системе координат 2-го радиометра находится орт \vec{a}_2 вектора $\overline{O_2M_2}$:

$$\vec{a}_2 = (x_2, y_2, z_2) = (\cos \theta_2 \sin \phi_2, \sin \theta_2, \cos \theta_2 \cos \phi_2).$$

4. Вычисляются координаты вектора $\overline{M_1M_2}$ перемещения объекта на промежутке $[t_1, t_2]$ с учётом полученных оценок дальности R_1 и R_2 по правилу вычитания векторов:

$$\begin{aligned} \overline{M_1M_2} &= \overline{O_2M_2} - \overline{O_2M_1} = \\ &= \overline{O_2M_2} - (\overline{O_1M_1} - \overline{O_1O_2}) = R_2\vec{a}_2 - R_1\vec{a}'_1 + \vec{b}. \end{aligned}$$

Признаком перемещения объекта по поверхности на промежутке времени $[t_1, t_2]$ является ненулевая длина вектора $\overline{M_1M_2}$ или с

учётом ошибок измерения – длина, превышающая некоторое пороговое значение.

5. В последовательности моментов времени t_2, t_3, \dots, t_K строится последовательность векторов $\overline{M_{k-1}M_k}$ $k = 2, 3, \dots, K$, указывающих направление движения объекта. Для фиксированных координат начальной точки M_1 с радиусом-вектором $\overline{O_1M_1} = R_1 \cdot \vec{a}_1$ последовательно определяются все точки M_1, M_2, \dots, M_K положений объекта и строится его траектория. Указанные операции выполняются для всех объектов.

Результаты моделирования

При моделировании рассматривались 3 радиометра, которые располагались последовательно на дуге окружности радиусом $r = 50$ м на одинаковом угловом расстоянии 10^0 друг от друга, на разной высоте в пределах от 0 до 5 м, с разной ориентацией осей антенных прямоугольных систем координат и эйлеровыми углами поворота в пределах от -10^0 до 10^0 .

Наблюдались 3 объекта, координаты центров которых задавались в прямоугольной системе координат центрального радиометра в следующих пределах: $x_1 = 3 - 5$ м, $x_2 = 4 - 6$ м, $x_3 = 50 - 54$ м. Амплитуды тепловых изображений объектов задавались в пределах от 5 до 7.

По результатам наблюдений объектов определялись орты векторов направлений на центры объектов. Координаты ортов искажались действием датчика нормальной помехи со среднеквадратическим отклонением (СКО) σ_x , имитируя ошибки измерения и последующего пересчёта координат.

Алгоритм пересчитывал координаты ортов векторов направлений в прямоугольную систему координат центрального радиометра и осуществлял классификацию векторов, включающих координаты ортов и амплитуды, по принадлежности тем или иным объектам. По результатам классификации для двух радиометров с наибольшей базой в 17 м определялись пары ортов векторов, направленных на

один и тот же объект, и на основе ортов и известного базового вектора вычислялись дальности до объекта. Эти операции выполнялись для каждого обнаруженного объекта.

Для оценки качества работы алгоритма вычислялась оценка СКО ошибки определения дальности путём сравнения оценок дальности до объектов с известными значениями дальности. Также по результатам классификации вычислялась оценка вероятности правильного обнаружения всех объектов. В таблице представлены оценки СКО ошибок определения дальности и вероятности правильного обнаружения всех объектов $P_{об}$ в зависимости от СКО σ_x ошибок измерения координат ортов.

Таблица. СКО ошибок определения дальности

σ_x (м)	0,001	0,002	0,003	0,004	0,005
СКО (м)	0,65	1,31	2,01	2,70	3,52
$P_{об}$	1	1	1	1	1

По результатам моделирования можно сделать вывод о сильном влиянии ошибок измерения координат ортов векторов на точность определения дальности. Для повышения помехоустойчивости следует увеличивать базовое расстояние и количество пар радиометров, участвующих в определении дальности.

Выводы

Предложенные в работе алгоритмы позволяют классифицировать радиотепловые изображения, полученные посредством радиометрических наблюдений при дистанционном зондировании земной поверхности, обнаруживать объекты по результатам классификации, измерять расстояния до объектов и строить векторы перемещений объектов. Алгоритмы могут найти практическое применение в существующих пассивных радиометрических системах

Поступила 25 апреля 2017 г.

миллиметрового диапазона длин волн, а также в оптико-электронных распределённых системах наблюдения за объектами при решении задач автоматического обнаружения и слежения за объектами.

Литература

1. Клочко В.К., Макарова О.Н. Восстановление изображений с оценкой аппаратной функции в радиометрических наблюдениях // VI Всероссийские Армандовские чтения (электронный ресурс): Радиотехнические методы дистанционного зондирования сред / Материалы 7-й Всероссийской научной конференции. Муром: Изд.-полиграфический центр МИ ВлГУ, 2016. С. 211 – 215.
2. Клочко В.К. Модель многоканальной системы оценивания координат элементов земной поверхности на базе бортовой доплеровской РЛС // Радиотехнические и телекоммуникационные системы, 2015. № 3. С. 40 – 44.
3. Николаев А.Г., Перцов С.В. Радиотеплолокация (пассивная радиолокация). - М.: Сов. радио, 1964. 335 с.
4. Пассивная радиолокация: методы обнаружения объектов / Под ред. Р.П. Быстрова и А.В. Соколова. - М.: Радиотехника, 2008. 320 с.
5. Цифровая обработка изображений в информационных системах: учеб. пособие / И.С. Грузман, В.С. Киричук и др. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. 352 с.
6. Василенко Г.И., Тараторин А.М. Восстановление изображений. - М.: Радио и связь, 1986. 304 с.
7. Клочко В.К. Математические модели и методы повышения эффективности формирования радиометрических изображений // Радиотехнические и телекоммуникационные системы, 2016. № 4. С. 75– 86.
8. Математические методы восстановления и обработки изображений в радиотеплооптоэлектронных системах / В.К. Клочко. - Рязань: РГРТУ, 2009. 228 с.
9. Гонсалес Р., Вудс Р., Эддинс С. Цифровая обработка изображений в среде MATLAB. - М.: Техносфера, 2006. 616 с.
10. Чураков Е.П. Введение в многомерные статистические методы: учеб. пособие. - СПб.: Изд-во «Лань», 2016. 148 с.

English

Algorithms of object detection, object range measurement and object transfer in the system of several radiometers

Vladimir Konstantinovich Klochko – Doctor of Engineering, Professor Ryazan State Radio Engineering University.

Sergey Mikhaylovich Gudkov – Postgraduate Student Ryazan State Radio Engineering University.

E-mail: klochkovk@mail.ru.

Address: 390005, Ryazan, Gagarin St., 59/1.

Abstract: The work investigates the system of several space-distributed radiometers scanning the same ground surface area while surveying objects at different angles on the surface. This is equivalent to surveying objects with the radiometer carrier moving along a certain pathway or in an orbit with repeated data extraction. Each object emits an electromagnetic field, which is received by the radiometer antenna in the millimeter-wave range, passes through the primary data-path and is transformed into radiothermal image (RTI) in local coordinate system. The radio intensity thermal image of each object in RTI matrix generally is nonhomogeneous and the object area can break up into several subareas (segments-fragments) of homogeneous intensity. Each of such subareas is selected in each radiometer RTI matrix by the operator manually or automatically via segmentation operations. The subareas observed in all radiometers are classified according to what segments these or those they belong to. The segments which underwent classification and have the close centers are considered belonging to one object. The number of objects is estimated, distances to objects and their movement are measured based on classification results. When classifying them the groups of subareas are formed upon criterion of how close they are to the center of each group in square-law sense. The group center is regarded as a point in the parameter space. The likelihood criterion of credibility with the known number of groups is a kind of total and is similar to criterion of the scale least-squares method. If the number of groups is unknown then simplified procedure to choose non-overlapping options with the least values of indicators is applied through the consecutive search algorithm with removing false options. Further the estimation algorithm of the center coordinates and of object quantity performs clustering operations - classifies highlighted groups by classes with the centers' close coordinates. Thereby the quantity of the detected objects and their coordinates are defined. To measure the distance to a separate object the minimum quantity of two radiometers with a big baseline (the distance between radiometers) is required. The geometrical calculations are repeated for all pairs of radiometers when surveying objects from different positions. As a result, the range to objects is measured from each radiometer. Moving objects under surveillance move along certain paths. Each object occupies certain positions on the ground surface within the moments of time sequence. If the object reference position is known then the object movement vectors are defined which are needed for its autotracking. Operations are performed for all objects.

Key words: passive radiovision, distributed system, radiometer, millimeter-wave range, range measurement, movement vector.

References

1. Klochko V.K., Makarova O.N. Image recovery with assessment of instrument function in radiometric observations. The 6th All-Russian Armandovsky readings (electronic resource): Radio physical methods of media remote sensing. Proceedings of the 7th All-Russian scientific conference. Murom: Izdatelsko-poligrafichesky tsentr MI VIGU, 2016. P. 211 - 215.
2. Klochko V.K. Multichannel system model of element coordinates evaluation of earth surface on the basis of onboard Doppler RS. Radiotekhnicheskiye i telekommunikatsionnye sistemy (RTS). 2015. No. 3. P. 40 - 44.
3. Nikolaev A.G., Pertsov S.V. Radio-heat radar detection (passive radar detection). M.: Sov. radio, 1964. 335 p.
4. Passive radar detection: Object detection methods. Ed. by R.P. Bystrov and A.V. Sokolov. M.: Radiotekhnika, 2008. 320 p.
5. Digital image processing in information systems: Textbook. I.S. Gruzman, V.S. Kirichuk, and other colleagues. Novosibirsk: Publ.H. NGTU, 2002. 352 p.
6. Vasilenko G.I., Taratorin A.M. Image Recovery. M.: Radio i svyaz 1986. 304 p.
7. Klochko V.K. Mathematical models and enhancing efficiency methods for radiometric image formation. - Radiotekhnicheskiye i telekommunikatsionnye sistemy (RTS). 2016. No. 4. P. 75 - 86.
8. Image recovery and processing mathematical methods in radioheat-optoelectronic systems. V.K. Klochko. Ryazan: RGRTU, 2009. 228 p.
9. Gonzalez R., Woods R., Eddins S. Digital image processing using MATLAB. M.: Tekhnosfera, 2006. 616 p.
10. Churakov E.P. Introduction to multidimensional statistical methods: Textbook. SPb.: Publ.H "Lan", 2016. 148 p.