

Дистанционное зондирование объектов земной поверхности в системе нескольких радиометров

В.К. Клочко, С.М. Гудков

Рязанский государственный радиотехнический университет, Рязань, ул. Гагарина, 59/1, РГРТУ, Email: klochkovk@mail.ru

В распределенных системах дистанционного зондирования Земли и наблюдения за наземными объектами посредством пассивного радиовидения миллиметрового диапазона, возникает необходимость классификации полученных радиометрами изображений по их соответствию тем или иным объектам, измерения дальности до обнаруженных объектов и установление факта их перемещения. В работе предложен подход к оптимальной классификации изображений и дана вычислительная процедура последовательного перебора вариантов для его реализации. По результатам классификации изображения, отнесенные к обнаруженным объектам, передаются на алгоритмы, которые измеряют дальность до каждого объекта. Измеренные дальности используются далее в алгоритме определения векторов перемещений объектов.

In distributed systems of Earth remote sensing and observation over terrestrial objects by means of passive millimetric range radiovision, there is a need of classification of the images received by radiometers by their compliance to these or those objects, measurements of range to the found objects and establishment of the fact of their relocation. In operation approach to optimum classification of images is offered and the computing procedure of sequential search of options for its implementation is this. By results of classification images, carried to the found objects, are transferred to algorithms which measure range to each object. The measured ranges are used further in an algorithm of determination of objects relocation vectors.

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 распределенных сканирующих радиометров или радиометров с антенной решеткой [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.

Целью работы является разработка алгоритмов обнаружения объектов на основе классификации наблюдаемых изображений, измерения дальности и векторов перемещений объектов на земной поверхности с помощью векторно-геометрических построений в системе нескольких радиометров дистанционного зондирования.

Постановка задачи и критерий оптимальной классификации

Система из n пространственно распределенных радиометров сканирует один и тот же участок земной поверхности, наблюдая объекты на поверхности под разными углами. Это эквивалентно наблюдению за объектами при движении носителя радиометра по определенной траектории или по орбите с n -кратным съемом данных. Каждый объект излучает электромагнитное поле, которое принимается антенной радиометра в мил-

лиметровом 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 (четкости) РТИ и тогда область D имеет более четкие 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, или параметр (x_1, x_2 – координаты центра области; x_3, x_4 и др. – температурные и 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 $\Omega_j, j = \overline{1, n}$, которые наиболее правдоподобно соответствуют одним и тем же сегментам РТИ объектов. Сегменты, прошедшие классификацию и имеющие близкие центры, считаются принадлежащими одному объекту. По результатам классификации дается оценка числа объектов M , измеряются расстояния до объектов и их перемещения.

Необходимым условием классификации является пересчет координат центров сегментов x_1, x_2 в единую систему координат некоторого центра (например, центрального радиометра). Это придает классификации характер кластеризации [10], так как центры соответствующих сегментов будут группироваться компактно.

Формирование ρ -х групп элементов множеств $\Omega_n, j = \overline{1, n}$, 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:

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

где $\mu_k > 0$ – весовой коэффициент степени важности k -го параметра, выбираемый эмпирически;

$x_k(i_{j,\rho}, j)$ – k -й элемент вектора $V(i_{j,\rho}, j)$, отнесенного 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) решается вначале 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 как

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

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

Процедура классификации

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 получается при последовательном исключении выбранных вариантов, дает оценку числа m .

Критерий оптимальной классификации в этом случае принимает вид:

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

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]:

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

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

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

Алгоритм последовательного перебора вариантов

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

1. На первом шаге $j = 1$ рассматривается множество Ω_1 . Каждый i -й элемент ($i = \overline{1, m_1}$) этого множества дает начало i -й группы, для нее 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 $Ni(1, i) = i$, $i = \overline{1, N_1}$, $N_1 = m_1$.

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

2.1. 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 (4):

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

2.2. 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 свое 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 присоединенного элемента: $Ni(j, g) = i$.

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

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

2.5. После выполнения операций п. п. 2.1 – 2.4 сформировано N_j наиболее перспективных групп. Запомнены оценки параметров $\bar{x}_k(g)$, $k = \overline{1, L}$, показатели правдоподобия $I(g)$ и номера присоединенных элементов $Ni(j, g)$.

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

4. Номера элементов $i_{1,\rho}, i_{2,\rho}, \dots, i_{n,\rho}$, $\rho = \overline{1, m}$, выделенных групп передаются на алгоритм оценивания координат центра и числа объектов.

Алгоритм оценивания координат центра и числа объектов

Данный алгоритм выполняет операции кластеризации [10] – классифицирует m групп по M классам ($M \leq m$) с близкими координатами центров (x_1, x_2) . Процедура кластеризации может быть следующей.

1. Выделенная 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 удален относительно центра 1-го кластера на величину, не превышающую Δ . Координаты центра присоединенной группы усредняются с координатами центра 1-го кластера. Тем самым корректируется центр. Номера элементов присоединенных групп исключаются из дальнейшего рассмотрения. По такому принципу рассматриваются все еще не присоединенные 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 обнаруженных объектов.

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

Алгоритм измерения расстояния до объектов

Для измерения расстояния до отдельного объекта требуется минимальное количество из 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 $O_1X_1Y_1$, и азимутом φ_1 , отсчитываемым от оси O_1Y_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:

$$\vec{a}_1 = (x_1, y_1, z_1) = (\cos\theta_1 \sin\varphi_1, \sin\theta_1, \cos\theta_1 \cos\varphi_1). \quad (5)$$

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):

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

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 :

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

В этой же системе координат рассматриваются три вектора: \vec{a}'_1 , \vec{a}_2 и вектор параллельного переноса $\vec{b}_2 = \overrightarrow{O_1O_2} = (-\Delta x, -\Delta y, -\Delta z)$. 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 А.

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:

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

$$R_1 = |\vec{b}_2| \sin(\alpha + \beta) / \sin\alpha, \quad R_2 = |\vec{b}_2| \sin\beta / \sin\alpha. \quad (7)$$

При малых значениях α решение (7) может быть неустойчивым, поэтому оценки дальности следует находить при достаточно больших базах $|\vec{b}_2|$.

5. Расчеты повторяются для всех пар радиометров при наблюдении точки А из разных положений. В результате измеряются дальности до объекта А от каждого радиометра. Аналогично измеряются дальности до остальных объектов (до их центров В, С, ...).

Алгоритм построения векторов перемещений объектов

Движущиеся объекты наблюдения перемещаются по определенным 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 $\overrightarrow{M_1M_2}, \overrightarrow{M_2M_3}, \dots, \overrightarrow{M_{K-1}M_K}$ перемещений объекта, необходимые для его автосопровождения [6].

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

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

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 $\vec{b}_2 = \overrightarrow{O_1O_2} = (-\Delta x, -\Delta y, -\Delta z)$.

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

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

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

$$\overrightarrow{M_1M_2} = \overrightarrow{O_2M_2} - \overrightarrow{O_2M_1} = \overrightarrow{O_2M_2} - (\overrightarrow{O_1M_1} - \overrightarrow{O_1O_2}) = R_2\vec{a}_2 - R_1\vec{a}'_1 + \vec{b}_2.$$

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

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

Литература

1. Ключко В.К., Макарова О.Н. Восстановление изображений с оценкой аппаратной функции в радиометрических наблюдениях // 6-е Всероссийские Армандовские чтения (электронный ресурс): Радиофизические методы дистанционного зондирования сред / Материалы 7-й Всероссийской научной конференции. Муром: Изд.-полиграфический центр МИ ВлГУ, 2016. С. 211 – 215.
2. Ключко В. К. Модель многоканальной системы оценивания координат элементов земной поверхности на базе бортовой доплеровской РЛС // Радиотехнические и телекоммуникационные системы (РТС). 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. Ключко В. К. Математические модели и методы повышения эффективности формирования радиометрических изображений // Радиотехнические и телекоммуникационные системы (РТС). 2016. № 4. С. 75 – 86.
8. Математические методы восстановления и обработки изображений в радиотеплооптоэлектронных системах / В. К. Ключко. 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.