

ДЕШИФРИРОВАНИЕ МНОГОЗОНАЛЬНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ. МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

© 2007 г. В. Б. Фофанов, канд. техн. наук; А. В. Демченко; Р. Ф. Кулеев

ЗАО "Научно-производственная фирма Оптоойл", г. Казань

E-mail: optoool@tbit.ru

В рамках ранее созданной математической модели сцены предлагаются метод поиска зон интереса и метод их сегментации с целью получения проекций находящихся там объектов и измерения их геометрических признаков. В качестве исходной информации о сцене служит набор ее изображений. Представлены результаты компьютерных экспериментов с использованием как модельных, так и псевдореальных сцен.

Коды OCIS: 100.0100.

Поступила в редакцию 07.09.2006.

Введение

В настоящей работе предлагаются методы поиска зон интереса, сегментации зон интереса и вычисления признаков объектов на основе модели сцены, изложенной в работе [1]. Каждая из перечисленных задач решается на соответствующем этапе дешифрирования, целью которого служит выявление на сцене заданных объектов. Предложенная модель позволяет построить для каждой задачи несколько методов ее решения, отличающихся формализацией доступной информации о сцене. В силу ограниченного объема статьи для каждой задачи приводится только по одному методу решения.

Настоящая работа является продолжением статьи [1]. Поэтому введенные там определения и обозначения будут использоваться далее без каких-либо напоминаний.

1. Поиск зон интереса

Поиском зон интереса будет называться задача, состоящая в определении для каждого заданного объекта сцены его зоны интереса путем указания координат ее верхнего левого пиксела и длины стороны. Рассмотрим один из возможных способов решения этой задачи на основе рассмотренной в работе [1] модели сцены.

В общем случае каждый пиксел сцены с координатами $z \in Z^2$ описывается v -мерной случайной величиной $\xi_z = (\xi_z^j)_{1 \leq j \leq v}$ с вектором средних значений $m_z = (m_z^j)_{1 \leq j \leq v}$ и ковариационной матрицей $C_{\{z\}} = (c_{ij}^{\{z\}})_{1 \leq i, j \leq v}$, а исходной информацией о сцене служит набор $x = (x^j)_{1 \leq j \leq v}$ ее изображений вида $x^j = (x_z^j)_{z \in Z^2}$. Пусть $\xi_A = (\xi_a)_{a \in A}$ – объект и $d(A)$ – его диаметр. Предположим, что $\xi_C = (\xi_z)_{z \in C}$ – зона интереса объекта ξ_A , а m_A и $m_{C/A}$ – неизвестные векторы средних значений самого объекта и его ок-

рестности. В этом случае для любого $a \in A$ и любого $z \in \text{Fr}(C)$ выполняется равенство $d(E\xi_a, E\xi_z) = d(m_A, m_{C/A}) > 0$.

С другой стороны, если векторные случайные величины, образующие квадрат $\xi_C = (\xi_z)_{z \in C}$, имеют одно и то же распределение с неизвестным вектором средних значений m_C , то в этом случае ξ_C зоной интереса уже не является. Поэтому для любых $t \in C/\text{Fr}(C)$ и $z \in \text{Fr}(C)$ выполняется равенство $d(E\xi_t, E\xi_z) = d(m_C, m_C) = 0$. Покажем, что приведенное различие между зоной интереса и пустым квадратом можно использовать для ее поиска.

Очевидно, что для любого квадрата $C \subset Z^2$ с центром в $a \in A$ и стороной $l \geq 2(d(A) - r) + 1$ имеет место соотношение $A \subset C/\text{Fr}(C)$. Это означает, что граница $\text{Fr}(C)$ квадрата C не имеет общих точек с проекцией A . Пусть $B(a, r) \subset A$ – круг с центром a и радиусом r , содержащий $n = |B(a, r)|$ точек. Известно, что в этом случае скалярные координаты векторной случайной величины $\bar{x}_a = (\bar{x}_a^j)_{1 \leq j \leq v}$, определяемые равенством

$$\bar{x}_a^j = \frac{1}{n} \sum_{t \in B(a, r)} x_t^j,$$

будут оценками неизвестных координат вектора $m_A = (m_A^j)_{1 \leq j \leq v}$.

Для оценки неизвестных координат вектора $m_{C/A} = (m_{C/A}^j)_{1 \leq j \leq v}$ разделим проекцию $\text{Fr}(C)$ границы $x_{\text{Fr}(C)} = (x_{\text{Fr}(C)}^j)_{1 \leq j \leq v}$ зоны интереса на s частей Fr_j , $1 \leq j \leq s$, по n точек в каждой. Тогда координаты векторных случайных величин \bar{x}_{Fr_j} и \bar{x}_j , $1 \leq j \leq s$, определяемых равенствами вида

$$\bar{x}_{\text{Fr}_j} = \frac{1}{|\text{Fr}(C)|} \sum_{t \in \text{Fr}(C)} x_t \quad \text{и} \quad \bar{x}_j = \frac{1}{|\text{Fr}_j|} \sum_{t \in \text{Fr}_j} x_t, \quad 1 \leq j \leq s,$$

будут оценками соответствующих координат вектора $m_{C/A}$. Если ξ_C – зона интереса, то используя свой-

ства векторных случайных величин, сформулированные в работе [1], можно показать, что при достаточно больших значениях r неравенство $d(\bar{x}_a, \bar{x}_{Fr}) \approx d(m_A, m_{C/A}) > d(m_{C/A}, m_{C/A}) \approx d(\bar{x}_j, \bar{x}_{Fr})$ имеет место для всех $j, 1 \leq j \leq s$. Другими словами, вероятность

$$P(d(\bar{x}_a, \bar{x}_{Fr}) > d(\bar{x}_j, \bar{x}_{Fr}), 1 \leq j \leq s) \quad (1)$$

этого события практически равняется единице.

С другой стороны, предположим, что ξ_C зоной интереса уже не является. Если $B(z, r)$ – круг из $C/Fr(C)$, то можно показать, что при достаточно больших значениях r приближенное равенство $d(\bar{x}_z, \bar{x}_{Fr}) \approx d(\bar{x}_j, \bar{x}_{Fr}) \approx d(m_C, m_C) = 0$ имеет место для всех $j, 1 \leq j \leq s$. Более того, вероятность

$$P(d(\bar{x}_z, \bar{x}_{Fr}) > d(\bar{x}_j, \bar{x}_{Fr}), 1 \leq j \leq s) \quad (2)$$

стремится к нулю с ростом s .

Последние два соотношения позволяют сформулировать решающее правило классификации квадратных участков сцены для рассмотренных выше условий. В самом деле, квадратный участок ξ_C сцены с центром в точке $a \in Z^2$ и стороной $l \geq 2(d(A) - r) + 1$ следует считать зоной интереса объекта с диаметром $d(A)$, если выполняется неравенство $d(\bar{x}_a, \bar{x}_{Fr}) > d(\bar{x}_j, \bar{x}_{Fr}), 1 \leq j \leq s$. В противном случае его следует считать пустым квадратом.

Вероятность правильной классификации зоны интереса при таком правиле принимает вид (1) и стремится с ростом r к единице. А вероятность ложного обнаружения зоны имеет вид (2). Она стремится к нулю при увеличении числа s фрагментов границы.

Для применения изложенного метода поиска зон интереса необходимо научиться выбирать для каждого объекта ξ_A окрестность $B(a, r)$, содержащуюся в его проекции A . Она используется для вычисления оценки \bar{x}_a неизвестного среднего значения m_A . Покажем, как это можно сделать.

Пусть A – проекция заданного объекта с неизвестными координатами и ориентацией, $2r_{\max}$ – диаметр круга с наибольшей площадью, принадлежащего проекции A , $2r$ – диаметр окрестности, используемой при сглаживании, $1 \leq r \leq r_{\max}$, а $e_1 = (1, 0)$ и $e_2 = (0, 1)$ – орты. Выберем произвольную точку $z_0 \in Z^2$ и зададим на Z^2 семейство кругов с диаметром, равным $2r$, и координатами z центров, определяемыми равенством

$$z = z_0 + i\Delta e_1 + j\Delta e_2, i \in Z, j \in Z, 1 \leq \Delta \leq 2(r_{\max} - r).$$

Нетрудно показать, что в этом случае всегда существует круг $B(a, r)$ из построенного выше семейства такой, что $B(a, r) \subset A$.

Результаты применения изложенного метода поиска зон интереса к сценам двух разных типов приводятся далее в разделе 3.

2. Сегментация

Под сегментацией зоны интереса в настоящей работе подразумевается разделение всех ее пикселей на два класса с условными именами “объект” и “фон”. Как и в случае поиска зон интереса, в рамках модели сцены, рассмотренной в работе [1], можно предложить несколько методов решения этой задачи. Ниже рассматривается обобщение известного метода квантилей на общий случай, когда каждый пиксел сцены описывается ν -мерной, $\nu \geq 1$, случайной величиной. Точно такой же подход можно применить и для обобщения известного метода мод.

Пусть снова $\xi_A = (\xi_a)_{a \in A}$ – объект, $\xi_C = (\xi_z)_{z \in C}$ – его зона интереса, а $m_A = (m_A^j)_{1 \leq j \leq \nu}$ и $m_{C/A} = (m_{C/A}^j)_{1 \leq j \leq \nu}$ – векторы средних значений самого объекта и его фона. Из определения зоны интереса следует, что для любых $a \in A$ и $z \in C/A$ имеет место неравенство

$$d(E\xi_a, m_{C/A}) = d(m_A, m_{C/A}) > d(E\xi_z, m_{C/A}) = 0. \quad (3)$$

Покажем, что его можно применить для сегментации зоны интереса.

Пусть $\bar{x}_z, z \in C/Fr(C)$ – оценка неизвестного вектора $E\xi_z$ средних значений, \bar{x}_{Fr} – оценка неизвестного вектора $m_{C/A}$, а $d(\bar{x}_z, \bar{x}_{Fr})$ – расстояние между ними. Упорядочим все расстояния по возрастанию. Из (3) следует, что при достаточно большом радиусе сглаживания r на $|A|$ последних местах в этом ряду будут находиться расстояния $d(\bar{x}_a, \bar{x}_{Fr}), a \in A$, соответствующие пикселям объекта.

Применение обобщенного метода квантилей для сегментации зон интереса приводится далее в разделе 3. Отметим, что для этого требуется знание площади $|A|$ объекта.

3. Компьютерные эксперименты

Для экспериментального исследования рассмотренных методов поиска зон интереса и сегментации были разработаны соответствующие программные средства. Компьютерные эксперименты проводились с использованием фрагментов двух типов сцен. Проекцией фрагмента сцены первого типа является квадрат со стороной равной 512 пикселям. Фрагмент состоит из двадцати девяти элементов. Двадцать восемь из них имеют прямоугольные проекции со сторонами, равными 19 и 9 масштабным единицам, случайные координаты и ориентацию. Они названы объектами. Оставшиеся пиксели образуют двадцать девятый элемент фрагмента, который будет называться фоном. Каждый пиксел с координатами $z \in Z^2$ является четырехмерной случайной величиной $\xi_z = (\xi_z^j)_{1 \leq j \leq 4}$ с независимыми

скалярными компонентами, распределенными по нормальному закону. Все пиксели, принадлежащие объектам, имеют одни и те же среднее $m_A^j = 100$ и дисперсию $(\sigma_A^j)^2 = 225$, $1 \leq j \leq 4$. У пикселей фона $m_{C/A}^j = 115$ и $(\sigma_{C/A}^j)^2 = 225$, $1 \leq j \leq 4$. Значение отношения сигнал/шум, определяемого для объекта с проекцией A по j -му, $1 \leq j \leq 4$, изображению равенством $k_A^j = \left| m_A^j - m_{C/A}^j \right| / (\sigma_A^j + \sigma_{C/A}^j)$, равняется в этом случае 0,5. Для сцены с такими свойствами выполняются предположения, сформулированные при построении математической модели. Поэтому далее такая сцена будет называться модельной. Фрагмент одной из четырех скалярных компонентов (изображений) этой сцены размером 256×256 пикселей представлен на рис. 1. Отметим, что визуальное выявление объектов по такому изображению требует определенных усилий и времени.

Еще одним примером сцены, которая используется в настоящей работе, служит участок суши, проекция которого является квадратом со стороной, равной 256 пикселям. Он порос травой (местами сильно вытоптанной), редким кустарником и отдельными деревьями. Кроме того, на нем присутствуют многочисленные следы, оставленные колесными и гусеничными транспортными средствами. Три скалярных изображения этого фрагмента получены оптико-электронной системой строчного типа с летательного аппарата в спектральных диапазонах $(0,7-1,1)$, $(3,0-5,0)$ и $(8,0-12,0)$ мкм. По условиям съемки сторона квадратного пиксела на местности должна равняться 0,3 м.

При наличии двух бортовых регистраторов для получения трех скалярных изображений над сценой приходилось совершать два пролета. Выполнить их по одной и той же траектории, как правило, не уда-

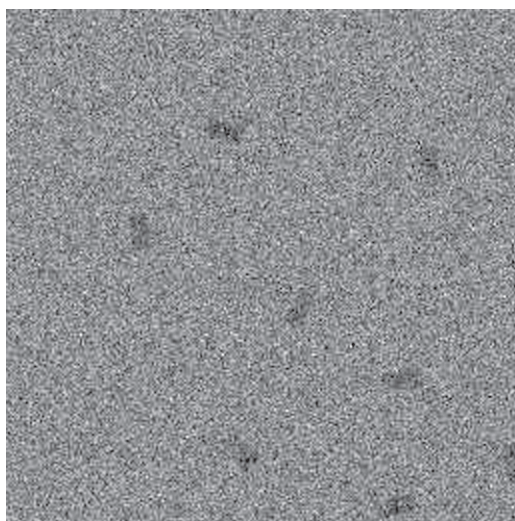


Рис. 1. Фрагмент модельной сцены.

валось. Поэтому изображения одних и тех же элементов сцены, сформированные в разных спектральных зонах, получались разных размеров. По этой же причине координаты одного и того же пиксела на различных изображениях получались разными. Следовательно, перед совместным дешифрированием трех изображений требовалось выполнить их масштабирование и пространственное совмещение. К сожалению, сделать это без погрешности также не удалось.

Для снижения отрицательного влияния на результаты дешифрирования вышеуказанных обстоятельств было принято решение о размещении на сцене восьми дополнительных объектов прямоугольной формы, габаритные размеры которых соответствовали габаритным размерам реальных объектов. В качестве оправдания этого решения отметим, что при заданном пространственном разрешении индивидуальные особенности конструкций реальных объектов на изображениях отсутствуют. Яркостями пикселей добавленных объектов служили трехмерные случайные величины с независимыми координатами, распределенными по нормальному закону. В качестве его параметров использовались оценки средних значений и дисперсий, полученные по соответствующим изображениям присутствующих на сцене реальных объектов. Для первого изображения среднее значение и дисперсия объектов составили $m_A^1 = 46$ и $(\sigma_A^1)^2 = 214$, для второго – $m_A^2 = 220$ и $(\sigma_A^2)^2 = 104$, а для третьего $m_A^3 = 230$ и $(\sigma_A^3)^2 = 27$. По окрестности каждого добавленного объекта с проекцией A для каждого из трех изображений были вычислены среднее $m_{C/A}^j$, дисперсия $(\sigma_{C/A}^j)^2$ и величина k_A^j , $1 \leq j \leq 3$. Они приведены в табл. 1. Такая сцена получила название псевдореальной. Ее изображения представлены на рис. 2–4. Находящиеся на сцене восемь добавленных объектов условно разделены на три строки (первая содержит два объекта, вторая и третья по три) и пронумерованы слева направо и сверху вниз. Все объекты хорошо заметны только на изображении, полученном в спектральном диапазоне $(0,7-1,1)$ мкм.

По указанным габаритным размерам объектов были выбраны исходные данные для поиска зон интереса: диаметр объектов $d(A) = 21$, минимальный радиус сглаживания $r = 1$, сторона зоны $l = 50$, шаг $\Delta = 6$. Для исследования влияния количества используемых скалярных изображений на результат поиска зон он выполнялся вначале отдельно для каждого скалярного изображения, затем для каждой пары, каждой тройки, а в случае модельной сцены, и для всех четырех изображений. Результаты поиска зон интереса представлены в табл. 2 и 3. Из-за больших различий скалярных изображений псевдореальной

Таблица 1. Псевдореальная сцена

Параметр изображения	Номер объекта							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Спектральный диапазон 0,7–1,1 мкм								
m_{CIA}^1	140	114	201	169	131	194	159	142
$(\sigma_{CIA}^1)^2$	364	779	341	1432	778	150	346	496
k_A^1	2,79	1,60	4,68	2,34	2,0	5,51	3,40	2,60
Спектральный диапазон 3,0–5,0 мкм								
m_{CIA}^2	66	42	234	152	124	239	226	184
$(\sigma_{CIA}^2)^2$	1343	423	525	2028	2134	78	281	1358
k_A^2	3,29	5,79	0,42	1,23	1,70	1,00	0,22	0,77
Спектральный диапазон 8,0–12,0 мкм								
m_{CIA}^3	66	54	214	151	112	197	189	133
$(\sigma_{CIA}^3)^2$	317	451	507	1655	2047	330	279	1510
k_A^3	7,13	6,66	0,58	1,72	2,34	1,41	1,87	2,20

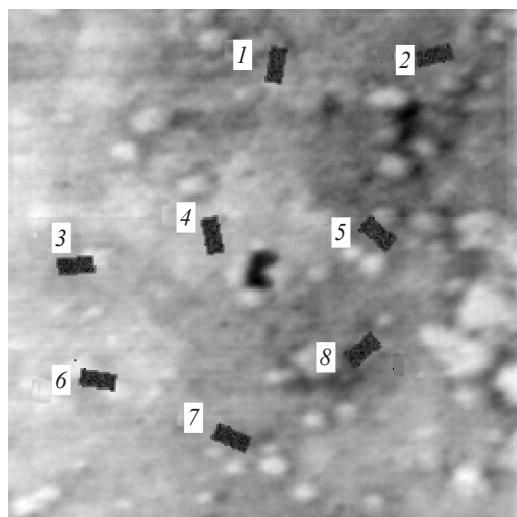


Рис. 2. Изображение № 1 псевдореальной сцены.

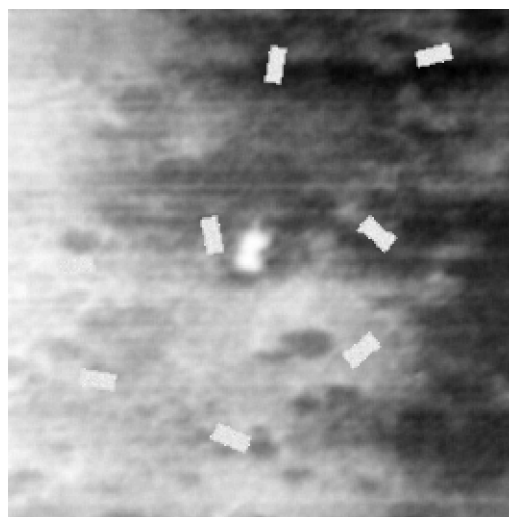


Рис. 4. Изображение № 3 псевдореальной сцены.

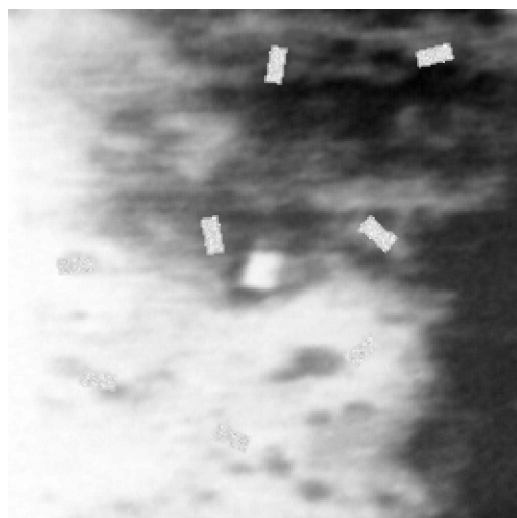


Рис. 3. Изображение № 2 псевдореальной сцены.

сцены данные о поиске зон представлены для каждой пары отдельно. Из них следует, что при добавлении нового изображения относительная частота правильного обнаружения зоны при совместном дешифрировании возрастает или остается без изменения (исключение только в одном случае). При использовании трех изображений псевдореальной сцены компьютер нашел зоны для всех восьми объектов независимо от r . Поэтому соответствующий столбец в табл. 3 отсутствует.

Сегментация зон интереса выполнялась с целью построения проекций заданных объектов, которые затем использовались для вычисления их габаритных размеров. Поэтому в табл. 4 и 5 представлены усредненные результаты измерения длины w и ширины h проекций, а также их абсолютные погрешности ε . Как и ожидалось, точность измерения растет с увеличением числа используемых компонен-

Таблица 2. Результаты поиска зон на модельной сцене

r	Количество v используемых компонентов			
	1	2	3	4
1	0,982	0,988	1,000	1,000
2	0,982	0,982	1,000	1,000
3	1,000	0,994	1,000	1,000

Таблица 3. Результаты поиска зон на псевдореальной сцене

r	Состав используемых компонентов					
	1	2	3	1, 2	1, 3	2, 3
1	0,875	0,625	0,750	1,000	1,000	0,875
2	0,875	0,625	0,875	1,000	1,000	0,875
3	1,000	0,625	0,875	1,000	1,000	0,875

Таблица 4. Результаты сегментации зон интереса модельной сцены

Размеры и погрешность	Количество v используемых компонентов			
	1	2	3	4
w	17,4	18,3	18,3	18,4
h	9,0	9,9	9,7	9,4
ε	1,7	1,6	1,2	1,1

Таблица 5. Результаты сегментации зон интереса псевдореальной сцены

Размеры и погрешность	Состав используемых компонентов						
	1	2	3	1, 2	1, 3	2, 3	1, 2, 3
w	17,8	18,3	16,6	18,8	19,0	18,8	18,4
h	8,8	8,0	8,8	8,9	8,8	7,8	8,9
ε	1,9	2,9	2,3	1,2	1,5	2,9	1,5

тов. Напомним, что реальные размеры объектов составляют 19 и 9 масштабных единиц или 6 и 3 м на сцене.

В качестве иллюстрации на рис. 5 представлен результат сегментации зон интереса реальной сцены с использованием всех трех изображений.

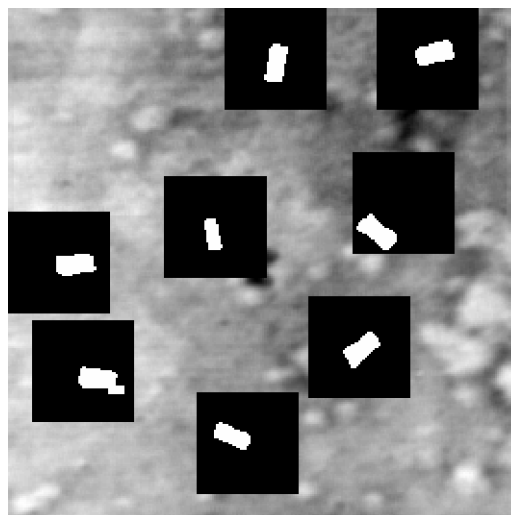


Рис. 5. Результаты совместной сегментации псевдореальной сцены.

Заключение

Предложен метод поиска на сцене квадратных участков с заданными объектами, которые названы зонами интереса, по набору ее изображений. Показано, что вероятность правильного обнаружения зоны стремится к единице при увеличении радиуса сглаживания, а вероятность ложного обнаружения стремится к нулю при увеличении числа фрагментов ее границы.

На основе случайного расстояния предложены обобщения известных методов сегментации мод и квантилей на общий случай, когда исходной информацией о сцене служат несколько ее изображений.

Приведены результаты компьютерных экспериментов, подтверждающие основные выводы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фофанов В.Б. Формализация сцены в задаче дешифрирования многозональных изображений // Оптический журнал. 2007. Т. 74. № 3. С. 51–54.