

УДК 519.67 : 629.78

Г. И. Перетягин

(Новосибирск)

ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМА ОБНАРУЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ
НА МНОГОЗОНАЛЬНОМ ИЗОБРАЖЕНИИ

Рассматривается метод построения согласованного фильтра-обнаружителя объектов переменной яркости на многозональном изображении. Обсуждаются вопросы практической реализации метода и приводятся результаты модельного эксперимента.

Из основных процессов, составляющих цикл получения целевой информации, наиболее сложным звеном автоматизированной обработки является дешифрирование, включающее задачи поиска и обнаружения заданных объектов. Многозональные дистанционные измерения, осуществляющие регистрацию лучистого потока в нескольких зонах оптического спектра, увеличивают возможности дешифрирования [1]. Процесс оптимального обнаружения объектов на многозональном изображении, как будет далее показано, сводится к следующим этапам:

- расчет авто- и кросскорреляционных функций фонов исходных составляющих многозонального изображения;
- построение ядер согласованных фильтров-обнаружителей;
- фильтрация изображений спектральных зон заданными ядрами;
- суммирование откликов по всем спектральным зонам;
- селекция локальных экстремумов и принятие решений о соответствии величин экстремумов откликам объектов.

На последнем этапе при построении статистического критерия, обеспечивающего обнаружение неизвестного числа объектов (считая их аномальными выбросами случайного поля откликов), нужна информация о поведении отфильтрованных переменных на «хвостах» их совместного распределения. Если такая информация имеется, то можно провести статистическое сравнение эмпирического распределения с ожидаемым (теоретическим) и выделить области их значимого расхождения [2].

Везде далее будем полагать U , V и т. д. N_1N_2 -мерными векторами, полученными из $[N_1 \times N_2]$ -матриц $[U]$, $[V]$ и т. д. разверткой их в одномерную последовательность некоторым регулярным способом (например, по столбцам). Многозональное изображение также будем представлять в виде вектора, составленного из N_1N_2 -мерных векторов (соответствующих исходным зональным изображениям $[U_1], \dots, [U_k]$):

$$U = (U_1^T U_2^T \dots U_k^T)^T.$$

Будем далее считать, что формы $\{S_i\}$ и яркости $\{a_i\}$ объектов в k спектральных диапазонах ($i = \overline{1, k}$) связаны соотношением

$$S_i(x, y) = a_i S_0(x, y), \quad (x, y) \in \Gamma,$$

где Γ — область, занимаемая объектом на изображении. Фоновые изображения предполагаются стационарными гауссовыми случайными полями с неизвестными статистическими характеристиками (поле на решетке [3]).

Если не принимать во внимание граничные элементы, то преобразование свертки массива монозональных данных $[U_i]$ с дискретизованным фильтром $\{S_{lm}; l = -L, L, m = -M, M\}$ может быть представлено в виде (см. также [4])

$$Z_i = S U_i,$$

где

$$S = \sum_{l=-L}^L \sum_{m=-M}^M S_{lm} ([T_l] \otimes [T_m])$$

— блочно-теплицева $[N_1 N_2] \times [N_1 N_2]$ -матрица, сформированная применением тензорного (кронекерова) произведения теплицевых матриц $[T_l]$ и $[T_m]$ (размерностями $[N_1 \times N_1]$ и $[N_2 \times N_2]$), состоящих из единиц на диагоналях, параллельных основной диагонали, и отстоящих от нее на l и m элементов соответственно (вне этих диагоналей стоят нули). Кронекерово произведение $[T_l] \otimes [T_m]$ реализуется блочно-теплицевой матрицей с элементами $[T_l]_{ij} [T_m]_{kl}$ на пересечении строки с номером $(i-1)N_2 + k$ и столбца с номером $(j-1)N_2 + l$. В частности, вектор O_{xy} , характеризующий изображение $[O_{xy}]$, содержащее лишь объект $\{S_{lm}; l = -L, L, m = -M, M\}$ с центром в точке (x, y) , имеет в данном представлении вид

$$O_{xy} = S 1_{xy},$$

где 1_{xy} — $N_1 N_2$ -мерный вектор, характеризующий текущее положение объекта и полученный разверткой нулевой матрицы-изображения с единицей в позиций (x, y) .

При гауссовом распределении фоновой составляющей логарифм отношения правдоподобия (для проверки наличия объекта на моноизображении $[U_i]$ в точке (x, y)) равен

$$\ln L(U_i) = \ln(f(U_i - S 1_{xy})/f(U_i)) = 1_{xy}^T S^T R_{ii}^{-1} U_i - 1_{xy}^T S^T R_{ii}^{-1} S 1_{xy},$$

где R_{ii} — ковариационная матрица элементов вектора U_i . Вдали от границ (на расстоянии полуразмера фильтра) величина $1_{xy}^T S^T R_{ii}^{-1} S 1_{xy}$ не зависит от координат (x, y) и селекция объектов сводится к свертке изображения с согласованным фильтром в используемом векторно-матричном представлении, имеющем вид $\Phi_{xy} = 1_{xy}^T S^T R_{ii}^{-1}$, и выделению значимых откликов в поле отфильтрованного изображения $V_i(x, y) = \Phi_{xy} U_i, (x, y) \in \Omega$ [4].

Для описания соответствующей обработки многозональных изображений будем иметь в виду, что выходом «многозонального» фильтра является поле откликов, суммирующее релевантную информацию по всем спектральным диапазонам. С учетом введенного выше представления многозонального изображения нетрудно понять, что дискретное преобразование «совместной» свертки соответствующего массива данных $U = (U_1^T U_2^T \dots U_k^T)^T$ определяется блочной матрицей $|S| = (S_1^T | S_2^T | \dots | S_k^T)^T$, составленной из вышеопределенных матриц S_i (характеризуемых формой объекта в соответствующем спектральном диапазоне). Ясно, что изображение, содержащее лишь объект с центром в точке (x, y) , также имеет вид

$$|S| 1_{xy} = ((S_1 1_{xy})^T | \dots | (S_k 1_{xy})^T)^T.$$

Ковариационная матрица элементов вектора U равна

$$|R| = \begin{vmatrix} R_{11} & \dots & R_{1k} \\ \dots & \dots & \dots \\ R_{k1} & \dots & R_{kk} \end{vmatrix},$$

где R_{ij} является кросскорреляционной матрицей изображений спектральных зон $[U_i]$ и $[U_j]$. Метод максимального правдоподобия вновь показывает, что согласованный фильтр-обнаружитель здесь имеет обычный вид:

$$\Phi_{xy} = \mathbf{1}_{xy}^T |S|^T |R|^{-1}.$$

Отклик данного многозонального фильтра $V_{xy} = \Phi_{xy}U$ подчиняется нормальному закону распределения с математическим ожиданием

$$E = \mathbf{1}_{xy}^T |S|^T |R|^{-1} |S| \mathbf{1}_{xy}$$

(если объект присутствует в точке (x, y)), дисперсией E и корреляционной матрицей $K_x = |S|^T |R|^{-1} |S|$. Достоверность обнаружения в данном случае зависит от амплитуды и формы «проявления» объекта в каждом спектральном диапазоне, так как эффективность обнаружения определяется энергией «выбеленного» выходного сигнала [4]:

$$E = (\mathbf{1}_{xy}^T |S|^T |R|^{-1/2}) (R^{-1/2} |S| \mathbf{1}_{xy}).$$

В частности, если зональные изображения взаимно не коррелированы и амплитуда проявления объекта в спектральных зонах одинакова, то энергия обобщенного отклика равна

$$E = a_0^2 \mathbf{1}_{xy}^T \{S_1^T R_{11}^{-1} S_1 + \dots + S_k^T R_{kk}^{-1} S_k\},$$

откуда непосредственно видно, что с ростом числа спектральных зон соответствующим образом растет и эффективность обнаружения.

Реализация вычисления оптимального многозонального фильтра является достаточно трудоемкой процедурой вследствие больших размеров матрицы $|R|$. Если при большом числе спектральных зон обращение $|R|$ практически неосуществимо, то иногда можно просто пренебречь кроссзональными статистическими связями (т. е. считать $R_{ij} \equiv 0$ при $i \neq j$ в матрице $|R|$) и обрабатывать каждый спектральный канал отдельно, просуммировав затем отклики зональных согласованных фильтров. Безусловно, это приводит к некоторой потере эффективности обнаружения, что подтверждается и экспериментальной проверкой.

Для моделирования многозональной обработки привлекалось спектрозональное аэроизображение, оцифрованное с применением (R, G, B) -фильтров. В каждую спектральную составляющую (R, G) -изображений аддитивно вносились объекты размером 5×7 пикселей (формат снимков 256×256 элементов). Амплитуды вносимых объектов и их число варьировались. Обнаружение объектов, т. е. принятие решений о соответствии величин локальных экстремумов откликам фильтра, осуществлялось на основе процедуры, изложенной в [2]. Результаты сравнительного исследования эффективности обнаружения объектов на двух-

Вариант обработки	Зоны	R	G	R	G	R	G	R	G
	Сигнал/Шум	2,2	2,2	2,2	2,0	2,2	1,75	2,0	1,5
1	$P_{обн}$	0,981	0,956	0,806	0,675				
2	$P_{обн}$	0,895	0,82	0,743	0,602				
3	$P_{обн}$	0,752	0,687	0,638	0,517				

зональном изображении методом согласованной фильтрации (в трех вариантах) приведены в таблице. В первом варианте фильтрующее ядро рассчитывалось с учетом всех элементов матрицы $|R|$, второй вариант соответствовал упрощенной обработке, т. е. матрицы R_{ij} ,

$i \neq j$, были приравнены нулю; третий вариант обработки соответствовал обнаружению объектов на одном (G)-изображении. В таблице приведены экспериментальные значения вероятностей обнаружения объектов ($P_{обн}$) в трех вариантах обработки при заданной вероятности ложной тревоги $P_{лт} = 0,01$. Во второй строке таблицы приведены значения амплитуд моделируемых объектов (в масштабе отношений сигнал/шум), вносимых в изображения соответствующих зон (первая строка таблицы).

Результаты моделирования показывают, что корректное проведение операции согласованной фильтрации многозональных изображений увеличивает вероятность обнаружения объектов по отношению к однозональной обработке. Отказ от учета кросскорреляционных связей (с целью упрощения и ускорения расчета согласованного фильтра), естественно, снижает эффективность обнаружения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зубарев Ю. Б., Сугдуллаев Ю. С. Спектральная селекция оптических изображений. — Ташкент: ФАН, 1987.
2. Перетягин Г. И. Об обнаружении группы объектов переменной яркости на изображении // Автометрия. — 1991. — № 3.
3. Перетягин Г. И. Представление изображений гауссовыми случайными полями // Автометрия. — 1984. — № 6.
4. Битюцкий О. И., Киричук В. С., Перетягин Г. И. Выделение локальных отличий при обработке последовательности изображений // Автометрия. — 1988. — № 5.

Поступила в редакцию 26 января 1993 г.