

## ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРНО-ИЕРАРХИЧЕСКИХ МЕТОДОВ АНАЛИЗА ИЗОБРАЖЕНИЙ

В.А. ГОРОХОВАТСКИЙ

Приведены результаты исследований по оптимизации параметров структурно-иерархических методов анализа изображений, применяемых для распознавания видео-объектов в условиях пространственных помех. Целевая функция соответствует значениям статистических критериев среднего риска или полной вероятности ошибки. Параметрами оптимизации выступают пороги для числа фрагментов и величины сходства фрагментов объекта и эталона. Приводятся результаты сравнительных расчетов и компьютерных экспериментов.

**Ключевые слова:** компьютерное зрение, структурные методы распознавания изображений, характерные признаки, иерархия, помехозащищенность, оптимизация.

### ВВЕДЕНИЕ

Структурно-иерархические методы (СИМ) эффективны при решении проблемы анализа и распознавания изображений в условиях пространственных помех, вызванных воздействием заслоняющих и фоновых объектов [1,2]. Принцип их построения предполагает вычисление локально-пространственной меры подобия  $\vartheta_{\Lambda}(\Lambda^1, \Lambda^2)$  между множествами  $\Lambda^1, \Lambda^2$  структурных описаний объекта и эталона. Вариант СИМ для случая преобразований смещения — это метод частных корреляций (МЧК) [2]. Его суть состоит в вычислении локального подобия между соответствующими друг другу фрагментами (как правило, независимыми внутри одного описания) объекта и эталона, логической обработке полученного вектора значений и формировании итогового подобия на этой основе. В результате мера подобия описывается векторно-пространственной моделью

$$\vartheta_{\Lambda}(\Lambda^1, \Lambda^2) = \Upsilon[\{\rho(\lambda_i^1, \lambda_i^2)\}_{i=1}^s, L^*, \delta_1],$$

где  $\lambda_i^1 \in \Lambda^1, \lambda_i^2 \in \Lambda^2, \{\rho(\lambda_i^1, \lambda_i^2)\}_{i=1}^s$  — вектор локальных значений подобия для фрагментов,  $s$  — число фрагментов,  $L^*$  — предикат для обработки значений  $\rho$ ,  $\delta_1$  — порог для величины подобия, который предназначен для устранения помех,  $\Upsilon$  — функционал, определяющий способ вычисления результирующего подобия объект-эталон. После вычисления  $\vartheta_{\Lambda}$ , как правило, дополнительно осуществляется логический анализ значимости  $\vartheta_{\Lambda}$  с применением порога  $\delta_2$ , который в большинстве применений сводится к заданию значимого числа фрагментов, которые могут представлять объект в задаче обнаружения или распознавания.

Нас будет интересовать главный вопрос, насколько эффективны подходы, в основу которых положен иерархический принцип обработки, и, в первую очередь, насколько он эффективнее традиционных подходов. Отметим как факт значительно более высокую помехозащищенность иерархического МЧК по отношению к традиционному корреляционному подходу. В частности, локальное искажение 30% точек изображения для

известных методов снижает вероятность правильного обнаружения объектов до величины 0,6, в то время как применение иерархических методов обеспечивает правильное обнаружение с вероятностью 0,95 при локальных искажениях до 75% точек изображения [1, 2].

Цель работы — обсуждение принципов оптимизации СИМ и получение сравнительных оценок именно в аналитическом виде. Представляет теоретический интерес оценить эффективность СИМ в сравнении с традиционным корреляционным методом в плане помехоустойчивости к воздействию флуктуационных и пространственных помех. Один из путей решения этой задачи — аналитическое представление функции среднего риска (или вероятности ошибки) и оценка его значения для обоих методов в зависимости от  $\delta_1, \delta_2$ . Важным есть также получение практических рекомендаций по выбору оптимальных значений порогов  $\delta_1, \delta_2$ .

### 1. ПРИНЦИП ОПТИМИЗАЦИИ СИМ

Принцип оптимизации параметров СИМ заключается в аналитическом описании статистических критериев с учетом меры подобия и вида фрагментов, а также распределений помех [3, 4].

В работе [3] получено аналитическое соотношение для среднего риска при применении МЧК для случая независимых фрагментов, когда функция яркости объекта и эталона имеет равномерное распределение, аддитивная помеха распределена по нормальному закону с известными параметрами, а в качестве локального подобия используется метрика суммы модулей разности яркостей. Для этой упрощенной ситуации аналитическое соотношение для среднего риска при принятии гипотезы о наличии эталона в предъявленном изображении объекта можно вывести, опираясь на схему независимых испытаний Бернулли, т.к. фрагменты не пересекаются между собой. Выражение для среднего риска при одинаковых стоимостях ошибок имеет вид

$$R(\delta_1, \delta_2) = \sum_{k=\delta_2+1}^s C_s^k p_1^k q_1^{s-k} + \sum_{k=1}^{\delta_2} C_s^k p_0^k q_0^{s-k}, \quad (1)$$

где  $\delta_1, \delta_2$  – пороги (параметры оптимизации),  $p_0, p_1$  – вероятности отклонения сходства в пределах порога  $\delta_1$ , которые вычисляются путем интегрирования  $n^2$ -мерной совместной плотности распределения, полученной для системы из трех случайных величин – объект, эталон, помеха ( $n^2$  – число точек фрагмента).

Обсудим поиск минимума функции среднего риска (1) от величин порогов  $\delta_1, \delta_2$ . Заметим, что (1) зависит еще и от размера изображения, от величин  $n, s$ , а также от параметров аддитивной помехи. Для упрощения анализа считаем все эти величины фиксированными. Из приведенных соотношений видим сложный нелинейный вид зависимости  $R(\delta_1, \delta_2)$ . При этом параметр  $\delta_1$  является одним из аргументов функции Лапласа, используемой при вычислении  $p_0, p_1$ , а дискретная величина  $\delta_2$  задает количество членов в суммах. Аналитическое решение такой задачи оптимизации в явном виде затруднено.

Численное решение задачи оптимизации проводилось путем компьютерного моделирования в целях вычисления целевой функции (1) для дискретных значений  $\delta_1, \delta_2$  из фиксированного диапазона – отрезка  $[0, 1]$ . Для нормированных величин порогов ( $\delta_1$  – относительно  $n^2$ ,  $\delta_2$  – относительно  $s$ ), и конкретно выбранных значений  $s=64$ ,  $n=2$  минимум риска (1) численно оценивался величиной  $R=0,005$ , а область соответствующих оптимальных значений порогов имеет вид  $0,6 < \delta_1 < 0,8$ ;  $0,4 < \delta_2 < 0,6$ . В качестве эталона в экспериментах использовалось изображение квадрата единичной яркости размером  $8 \times 8$  элементов на нулевом фоне в поле зрения  $16 \times 16$ .

Таким образом, численное решение задачи минимизации среднего риска при фиксированных параметрах СИМ и уровня помех позволяет выбирать диапазон оптимальных с точки зрения минимума среднего риска значений для порогов  $\delta_1, \delta_2$ .

## 2. ВИД СТАТИСТИЧЕСКИХ КРИТЕРИЕВ С УЧЕТОМ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ПОМЕХ

Еще более сложный аналитический вид имеют математические выражения для критерия среднего риска с учетом модели пространственной помехи, т.к. в этом случае уже имеем систему из четырех случайных величин [4]. Поэтому сравнительный анализ иерархического и традиционного методов проведем на доступном примере с соблюдением всех предположений, но для небольшого количества точек. Это дает возможность сделать качественные выводы. Пусть изображение задано на двух фрагментах, а каждый фрагмент состоит из одной точки. Порог  $\delta_2 = 1$  зафиксируем так, чтобы принимать гипотезу об обнаружении эталона, если хотя бы одна из двух величин подобия фрагментов принадлежит интервалу  $(-\delta_1, \delta_1)$ .

Полученные выражения для полной вероятности ошибки иерархического  $P_H$  и традици-

онного  $P_T$  методов при таких предположениях представим в виде

$$P_H = 0,5\{1 + p_1 p_2 [4\Phi^2(\delta_1) - [F_1(\delta_1)]^2] + (p_1 q_2 + p_2 q_1) \times F_2(\delta_1) [2\Phi(\delta_1) - F_1(\delta_1)] - (p_1 + p_2) [2\Phi(\delta_1) - F_1(\delta_1)]\},$$

$$P_T = 0,5\{1 + p_1 p_2 [\Phi((\delta_1 + 2E)/\sqrt{2}) + \Phi((\delta_1 - 2E)/\sqrt{2}) - 2\Phi(\delta_1/\sqrt{2})] + (p_1 q_2 + p_2 q_1) [\Phi((\delta_1 - A + E)/\sqrt{2}) + \Phi((\delta_1 + A - E)/\sqrt{2}) - \Phi((\delta_1 - A)/\sqrt{2}) - \Phi((\delta_1 + A)/\sqrt{2})]\}, \quad (2)$$

где  $\Phi$  – функция Лапласа,  $E$  – значение эталона,  $A$  – величина различия между значениями пространственной помехи и эталона,  $q_1, q_2$  – вероятности появления пространственной помехи,

$$F_1(\delta_1) = \Phi(E + \delta_1) - \Phi(E - \delta_1),$$

$$F_2(\delta_1) = \Phi(A + \delta_1) - \Phi(A - \delta_1).$$

## 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Типичные зависимости вероятности ошибок (2) от параметра  $\delta_1$  для конкретных величин  $q_1, q_2$  приведены на рис. 1, где штриховые кривые 1,3 относятся к традиционному методу, сплошные кривые 2,4 – к иерархическому МЧК. Для осуществления качественной оценки приведены зависимости при  $A=10$  (кривые 3,4), что характеризует существенное различие помехи и объекта, а также при  $A=1$  (кривые 1,2) – незначительное отличие. Разное число точек в кривых объясняется зависимостью диапазона изменения порога  $\delta_1$  от величины  $A$ .

Анализ рис. 1 показывает, что при существенных отличиях ( $A=10$ ) иерархический метод имеет ощутимые преимущества: минимум вероятности ошибки для него составляет 0,16 против 0,35 для традиционного метода. В то же время при незначительных отличиях преимущества практически нет: минимумы равняются 0,48 и 0,43. Это можно объяснить более значительными интегральными свойствами традиционного метода, потому что при значении  $A \approx 0$  действие пространственных помех можно считать эквивалентным аддитивным флуктуациям. Этот факт подчеркивает тесную связь более универсального МЧК и традиционного метода, который можно считать его частным случаем, не использующим разбиения на фрагменты. Преимущества применения МЧК усиливаются с увеличением различий между значениями пространственной помехи и объекта.

Эксперименты показали, что минимум вероятности ошибки (значение 0,21) практически совпадает у обоих методов при  $A=3,5$ . Полученные зависимости (рис. 1) характерны для всех диапазонов значений  $q_1, q_2$ . Предположение о зависимости  $P_H, P_T$  от вероятностей  $q_1, q_2$  не подтвердилось. Приведенный пример подтверждает возможность оптимального выбора порогов в иерархическом методе, при которых показатель его

помехоустойчивости (вероятность ошибки) будет лучше, чем у традиционного подхода.



Рис. 1. Зависимости вероятности ошибки от порога  $\delta_1$

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые предложен и обоснован принцип оптимизации параметров иерархических корреляционных методов распознавания изображений, который предусматривает оптимизацию в соответствии с аналитически представленными статистическими критериями и с учетом меры подобия фрагментов, а также распределений помех, что подтвердило преимущества и универсальность синтезированных методов с применением иерархической обработки. На основе аналитических соотношений доказано, что в случае значительных отличий пространственной помехи и объекта иерархический метод имеет ощутимые преимущества с точки зрения минимума критерия ошибки.

По результатам аналитических исследований и проведенного компьютерного моделирования делаем вывод о преимуществах и гибкости иерархического метода в случае действия локальных помех. Путем использования комбинаций фрагментов и построенных на них мерах сходства в иерархических методах удается учесть и исключить возможные искажения отдельных фрагментов, вызванные пространственными помехами. Эти преимущества усиливаются с увеличением отличий между яркостями помехи и объекта.

Перспективы исследования связаны с адаптацией разработанных методов к уровню пространственной помехи, что дало бы возможность управлять выбором параметров.

### Литература

[1] Гороховатский В.А. Структурное распознавание изображений на основе моделей голосования признаков характерных точек / В.А. Гороховатский, Е.П. Пуятин // Реєстрація, зберігання і обробка даних.— 2008.— Т.10.— №4.— С.75-85.

[2] Пуятин Е.П. Обработка изображений в робототехнике / Е.П. Пуятин, С.И. Аверин. — М.: Машиностроение, 1990. — 320 с.

[3] Гороховатский В.А. Оптимизация иерархических корреляционных алгоритмов анализа изображений / В.А. Гороховатский, В.В. Шляхов // Изв. вузов. Радиоэлектроника.—1988.—Т.31.— №1.— С.28–33.

[4] Гороховатский В.А. Анализ иерархических алгоритмов совмещения изображений на фоне пространственных локальных помех / В.А. Гороховатский, В.В. Шляхов // Изв. вузов. Радиоэлектроника.— 1991.— Т.34.— №1.— С. 75–78.

Поступила в редколлегию 15.10.2010



**Гороховатский Владимир Алексеевич**, канд. техн. наук, доцент, профессор кафедры информатики ХНУРЭ. Область научных интересов: модели, методы, информационные технологии анализа и распознавания изображений.

УДК 004.932.2:004.93'1

**Оптимізація структурно-ієрархічних методів аналізу зображень** / В.О. Гороховатський // Прикладна радіоелектроніка: наук.-техн. журнал. — 2010. Том 9. № 4. — С. 577-579.

Наведено результати досліджень з оптимізації параметрів структурно-ієрархічних методів аналізу зображень, що застосовуються для розпізнавання відео-об'єктів в умовах дії просторових завад. Цільова функція відповідає значенням статистичних критеріїв середнього ризику або повної ймовірності помилки. Параметрами оптимізації є пороги для числа фрагментів та значення схожості фрагментів об'єкту та еталону. Наводяться результати порівняльних розрахунків та комп'ютерних експериментів.

*Ключові слова:* комп'ютерний зір, структурні методи розпізнавання зображень, характерні ознаки, ієрархія, завадостійкість, оптимізація.

Лл. 1. Бібліогр.: 4 найм.

UDC 004.932.2:004.93'1

**Optimization of structurally-hierarchical methods of image analysis** / V. A. Gorohovatskiy // Applied Radio Electronics: Sci. Mag. — 2010. Vol. 9. № 4. — P. 577-579.

The results of researches on optimization of structurally-hierarchical method parameters of image analysis, that are applied for video-objects recognition in conditions of spatial influences are shown. The result function corresponds to values of statistical middle risk or complete probability error criteria. Thresholds are used as optimization parameters for the quantity of fragments and value of object and etalon fragments similarity. Results of comparative calculations and computer experiments are shown.

*Keywords:* computer vision, structural image recognition methods, characteristic features, hierarchy, noise immunity, optimization.

Fig. 1. Ref.: 4 items.