

Исследование влияния размера разноплановой особенности на эффективность обнаружения при отклонениях от нормального закона распределения интенсивности

Д.А. Петров, С.В. Поликарпов

Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону

Аннотация: Обнаружение и идентификация особенностей на телевизионных изображениях является одной из важных проблем в системах технического зрения. Эффективность работы систем технического зрения напрямую зависит от эффективности работы этапа обнаружения особенностей.

Ключевые слова: обработка изображений, техническое зрение, робастный обнаружитель, эффективность обнаружения.

Введение

Обнаружение и идентификация особенностей на телевизионных изображениях является одной из важных проблем в системах технического зрения. Проблема возникает при сопровождении ориентиров, обнаружении движения объектов, при создании автономных систем навигации, при поиске соответствий между изображениями и при проведении дистанционных измерений. Важным этапом обработки изображения является устойчивое обнаружение и идентификация особенностей изображения (ориентиров) при изменении условий наблюдения.

На текущий момент известны различные обнаружители особенностей изображений. Детектор Харриса обнаруживает угловые особенности при произвольной пространственной ориентации. Детектор Кэнни обеспечивает обнаружение краёв объектов. Дальнейшим развитием детектора Харриса можно считать алгоритм KLT, обеспечивающий обнаружение особенностей изображения и обладающий инвариантностью к аффинным преобразованиям. Известны инвариантные к повороту и масштабированию детекторы SIFT и SURF. Генетический метод и алгоритм обнаружения

особенностей, основанный на адаптации алгоритма обнаружения к специфике анализируемой сцены, предложен L. Trujillo, G. Olague[1].

Одной из важных проблем для описанных алгоритмов является инвариантность результатов обнаружения особенностей к изменению условий наблюдения. Изменение освещённости сцены приводит к изменению числа особенностей, выделяемых обнаружителем, или к фиксации ложных ориентиров (ложных тревог). Это определяет актуальность обработки полутоновых изображений, подверженных воздействию возмущающих факторов внешней среды.

В [2] исследован робастный алгоритм обнаружения яркой точечной особенностителевизионных изображений с использованием маски размером 3×3 элемента. Алгоритм обнаружения обеспечивает устойчивую структуру и качественные показатели по отношению к условиям наблюдения (присутствует априорная неопределённость в отношении статистических параметров фонового излучения во времени). Получены расчётные соотношения для оценки вероятностных параметров обнаружения [2]: вероятности правильного обнаружения и вероятности ложной тревоги.

Позднее в [3] предложен универсальный робастный алгоритм обнаружения разноплановых особенностей телевизионных изображений с устойчивой структурой и качественными показателями по отношению к условиям наблюдения. Предлагаемые алгоритмы используют маску размером 3×3 элемента. Естественно предположить, что переход к применению масок с размерами 4×4 или 5×5 элементов обеспечит более высокую вероятность правильного обнаружения многоэлементных особенностей. При этом не ясно, как неравномерность освещённости сцены скажется на устойчивости и эффективности алгоритмов.

Цель исследований состоит в разработке алгоритмов обнаружения разноплановых особенностей телевизионных изображений с использованием

масок размером 4×4 и 5×5 элементов и оценке их качественных показателей в условиях неравномерности освещённости сцены.

Постановка задачи. Пусть в контролируемом пространстве присутствуют особенности, которые в выходном сигнале телевизионной камеры на ПЗС-матрице представляются отдельными элементами разложения (пикселями). В них накопленные за время наблюдения заряды превышают заряды, накопленные за то же время наблюдения в соседних фоновых элементах разложения. Считается, что в процессе поиска особенности на изображении присутствует априорная неопределённость в отношении статистических параметров фонового излучения, причём как во времени, так и по поверхности спроецированного контрольного поля. Последнее является основанием для поиска решения задачи в классе робастных алгоритмов обнаружения.

Сцена на ПЗС-матрице представляется дискретным набором пикселей, образуя матрицу из горизонтальных строк и вертикальных столбцов. Сигнал с каждого фотоэлемента матрицы пропорционален энергии, накопленной за время наблюдения.

Процесс с фонового элемента разложения подчинён нормальному закону $p_0(u) = N(m_0, \sigma^2)$ с математическим ожиданием m_0 и дисперсией σ^2 . Процесс с сигнального фотоэлемента также подчинён нормальному закону $p_1(u) = N(m_1, \sigma^2)$ с той же дисперсией, но с другим математическим ожиданием m_1 . Причём всегда $m_1 > m_0$.

Исходной предпосылкой для синтеза робастного обнаружителя является изображение участка сцены (маски) размером $r \times r$ (3×3 , 4×4 и 5×5 пикселей), проецируемого на ПЗС-матрицу (рисунок 1) с количеством пикселей $z = r^2$.

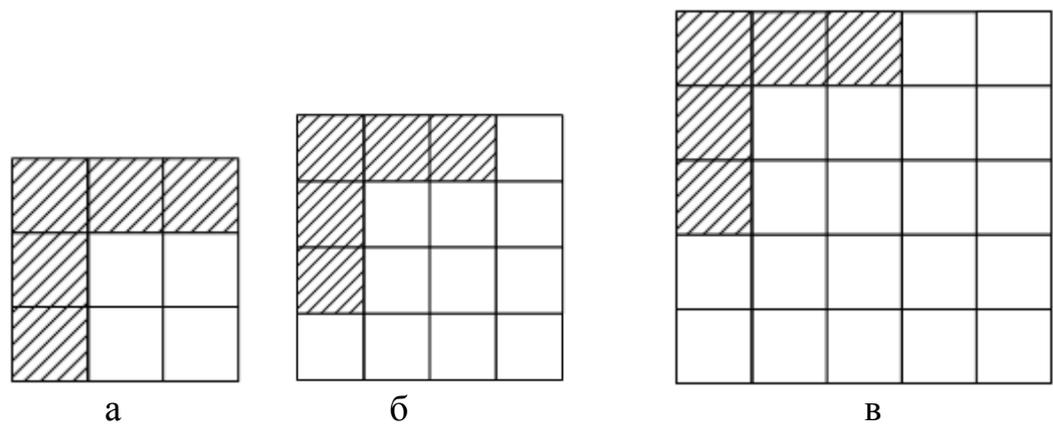


Рис. 1. –Условное изображение участка сцены (маски) размером 3×3 (а), 4×4 (б) и 5×5 (в) пикселей

В каждом пикселе содержится информация об энергии, накопленной соответствующим фотоэлементом за время наблюдения. Таким образом, для маски формируется матрица размером $\gamma \times \gamma$ (3×3, 4×4 и 5×5 пикселей)

$$\begin{aligned} \|u_{ij}\|_{3,3} &= \begin{vmatrix} u_{11} & u_{12} & u_{13} \\ u_{21} & u_{22} & u_{23} \\ u_{31} & u_{32} & u_{33} \end{vmatrix}; \\ \|u_{ij}\|_{4,4} &= \begin{vmatrix} u_{11} & u_{12} & u_{13} & u_{14} \\ u_{21} & u_{22} & u_{23} & u_{24} \\ u_{31} & u_{32} & u_{33} & u_{34} \\ u_{41} & u_{42} & u_{43} & u_{44} \end{vmatrix}; \\ \|u_{ij}\|_{5,5} &= \begin{vmatrix} u_{11} & u_{12} & u_{13} & u_{14} & u_{15} \\ u_{21} & u_{22} & u_{23} & u_{24} & u_{25} \\ u_{31} & u_{32} & u_{33} & u_{34} & u_{35} \\ u_{41} & u_{42} & u_{43} & u_{44} & u_{45} \\ u_{51} & u_{52} & u_{53} & u_{54} & u_{55} \end{vmatrix}. \end{aligned} \quad (1)$$

Синтез решающего правила обнаружения особенности. Пусть проверяется гипотеза о принадлежности группы из k пикселей к выделяемой особенности. Отсчёты энергий с этих пикселей образуют сигнальную выборку $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_k\}$. Остальные $w=(z-k)$ пикселей формируют опорную фоновую (шумовую) выборку $X = \{x_1, x_2, \dots, x_w\}$.

Например, пусть проверяется гипотеза о наличии угловой особенности в маске размером 3×3 пикселя (рисунки 1,а), располагаемой в 1-м, 2-м и 3-

мэлементах первой строки, в первых элементах второй и третьей строк. Формируется сигнальная выборка из 5-ти элементов $Y = \{y_1, y_2, y_3, y_4, y_5\}$, где согласно (1) $y_1 = u_{11}, y_2 = u_{12}, y_3 = u_{13}, y_4 = u_{21}, y_5 = u_{31}$. При этом элементам опорной выборки $X_5 = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5\}$ соответствуют 4 элемента: $x_1 = u_{22}, x_2 = u_{23}, x_3 = u_{32}, x_4 = u_{33}$.

Эта же угловая особенность для маски размером 4×4 (рисунок 1,б) формируется той же выборкой из 5-ти элементов $Y = \{y_1, y_2, y_3, y_4, y_5\}$. А вот опорная выборка $X = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10}, x_{11}\}$ формируется 11 элементами:

$$x_1 = u_{14}, x_2 = u_{22}, x_3 = u_{23}, x_4 = u_{24}, x_5 = u_{32}, x_6 = u_{33}, x_7 = u_{34}, x_8 = u_{41}, x_9 = u_{42}, x_{10} = u_{43}, x_{11} = u_{44}$$

. Для матрицы размером 5×5 опорная выборка формируется уже 20-ю элементами.

Заметим, что дисперсия случайного процесса как с фоновых, так и с сигнальных пикселей неизменна. Данное предположение оправдано, поскольку в ПЗС-матрице шумы определяются только тепловыми шумами устройства при отсутствии глубокого охлаждения фотодетектора. Ввиду отсутствия внутреннего умножения заряда в ПЗС дробовыми шумами излучения можно пренебречь. Это же относится к амплитудным шумам и шумам темнового тока.

Особо отметим, что математическое ожидание m_0 случайного процесса с фонового фотозлемента и дисперсия σ^2 априорно неизвестны. Следовательно, при недостатке априорных данных в отношении статистических свойств процесса извлечение информации посредством выборки должно быть полным.

В исследуемом случае для обнаружения группы сигнальных пикселей необходимо организовать взятие дополнительных выборок с выделением информации о шумовом (фоновом) процессе. Использование дополнительной фоновой выборки наряду с анализируемой выборкой в решаемой задаче рассматривается как более полное отображение наблюдаемого процесса в конечномерное выборочное пространство. Поскольку математическое ожидание распределения отсчётов для опорной фоновой выборки m_0 отлично от нуля, то задача проверки гипотез содержит мешающие параметры σ^2 и $m_0 > 0$.

В [4] получен равномерный наиболее мощный инвариантный (РНМИ) алгоритм обнаружения для маски размером 3×3 элемента. Следуя применённой здесь методике, получим равномерный наиболее мощный инвариантный (РНМИ) алгоритм обнаружения для маски размером $g \times g$:

принимается решение об обнаружении разноплановой особенности телевизионного изображения с использованием маски размером $g \times g$ при выполнении неравенства

$$t > C_{th}. \quad (7)$$

Тестовой статистикой t здесь является функция

$$t = \frac{\sqrt{(r^2 - 2) \cdot w \cdot k}}{r} \cdot \frac{\bar{Y} - \bar{X}}{\sqrt{\sum_{i=1}^w (x_i - \bar{X})^2 + \sum_{j=1}^k (y_j - \bar{Y})^2}}. \quad (8)$$

$$\text{Здесь } \bar{Y} = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k y_j, \bar{X} = \frac{1}{w} \sum_{i=1}^w x_i$$

Решающее правило выделения особенностей на участке сцены. Вводя обозначения для пороговой константы

$$L_3 = \frac{3 \cdot C_{th}}{\sqrt{7k(9-k)}}, L_4 = \frac{4 \cdot C_{th}}{\sqrt{14k(16-k)}}, L_5 = \frac{5 \cdot C_{th}}{\sqrt{23k(25-k)}} \quad (9)$$

решающее правило (7) с учётом (8) – (10) преобразуется к виду

$$\bar{Y} - \bar{X} - L_r \sqrt{\sum_{i=1}^w (x_i - \bar{X})^2 + \sum_{j=1}^k (y_j - \bar{Y})^2} > 0. \quad (10)$$

Отметим, что алгоритм выделения особенностей представленных на рисунке 2 одинаков. Различие заключается только в выборе элементов матрицы (1) для формирования опорной и анализируемой выборок.

Кроме того, из выражения (10) следует, что для выделения особенностей «б», «в», «г» на рисунке 2 применим общий алгоритм. Формула (10) доказывает устойчивость структуры робастного обнаружителя к изменениям условий наблюдения.

Вероятность ложной тревоги. Тестовые статистики (8) имеют центральное t-распределение Стьюдента с 7-ю, 14-ю, 23-мя степенями свободы при проверке гипотезы H_0 . При этом пороговая константа C_{th} в формуле (7) определяется требуемой вероятностью ложной тревоги

$$P_{лт} = \int_{C_{th}}^{\infty} t_7(u) \cdot du = \int_{C_{th}}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{7\pi}} \cdot \frac{\Gamma(4)}{\Gamma(3,5)} \cdot \left(1 + \frac{u^2}{7}\right)^{-4} du \quad (11)$$

$$P_{лт} = \int_{C_{th}}^{\infty} t_{14}(u) du \quad (12)$$

$$P_{лт} = \int_{C_{th}}^{\infty} t_{23}(u) du. \quad (13)$$

Функция $t_7(u)$ в формуле (11) представляет центральное распределение Стьюдента с 7-ю степенями свободы при условии, что верна гипотеза H_0 .

Аналогично $t_{14}(u)$ и $t_{23}(u)$ представляют собой центральное распределение Стьюдента с 14-ю и 23-мя степенями свободы при условии, что верна гипотеза H_0 .

В математической статистике величину $t(Q, n)$, удовлетворяющую условию $\Pr\{t > t(Q, n)\} = Q/100$, называют Q-процентной точкой распределения Стьюдента. С учётом сделанных уточнений, пороговая константа в (7) может быть определена по формуле

$$C_{th} = t(100P_{лт}, z - 2). \quad (14)$$

Используя таблицу процентных точек центрального распределения Стьюдента в [5], находим необходимые значения пороговой константы C_{th} в формуле (7). Выбор значения пороговой константы $C_{th}=1,415$ гарантирует вероятность ложных тревог в 10 %, $C_{th}=1,895$ – 5 %, $C_{th}=2,365$ – 2,5 %, $C_{th}=2,998$ – 1 %, $C_{th}=3,499$ – 0,5 % и, наконец, $C_{th}=4,785$ – 0,1 %.

Заметим, что значение пороговой константы C_{th} не связано с количеством сигнальных пикселей в выделяемой особенности. Напротив, значение пороговой константы L , как следует из формулы (9), зависит от числа сигнальных пикселей.

Таблица № 1

Значения пороговой константы L

Размер матрицы k	Вероятность ложной тревоги, %					
	10	5	2,5	1	0,5	0,1
3x3	0,3588	0,4805	0,5996	0,7601	0,8872	1,2132
4x4	0.1939	0.2538	0.3092	0.3782	0.4291	0.5459
5x5	0.1376	0.1787	0.2157	0.2606	0.2927	0.3633

Из формул (8-10) следует, что значения пороговых констант C_{th} и L не зависят от априорно неизвестных значений математического ожидания m_0 и дисперсии σ^2 интенсивностей фоновых пикселей. Это свидетельствует о практически важном свойстве устойчивости решающего правила (10).

Эффективность робастного обнаружителя. Функция мощности критерия (7) определяет эффективность робастного обнаружителя, т.е. вероятность правильного обнаружения.

Для оценки вероятности правильного обнаружения особенности размером 3x3 воспользуемся выражением

$$\beta(\delta) = \int_{C_{th}}^{\infty} t_7(u, \delta) du \quad (15)$$

Функция $t_7(u, \delta)$ представляет t-распределение Стьюдента с 7-ю степенями свободы и параметром нецентральности

$$\delta = \frac{\sqrt{k \cdot (9 - k)}}{3} \cdot \frac{m_1 - m_0}{\sigma} = \frac{\sqrt{k \cdot (9 - k)}}{3} \cdot q. \quad (16)$$

Для особенностей 4x4 и 5x5 будет использована функция $t_{14}(u, \delta)$ и $t_{23}(u, \delta)$

С учётом этого параметр нецентральности для случая 4x4 и 5x5.

$$\delta = \frac{\sqrt{k \cdot (16 - k)}}{4} \cdot \frac{m_1 - m_0}{\sigma} = \frac{\sqrt{k \cdot (16 - k)}}{4} \cdot q. \quad (17)$$

$$\delta = \frac{\sqrt{k \cdot (25 - k)}}{5} \cdot \frac{m_1 - m_0}{\sigma} = \frac{\sqrt{k \cdot (25 - k)}}{5} \cdot q. \quad (18)$$

Параметр $q = (m_1 - m_0)/\sigma$ в формулах (20)-(22) может трактоваться как отношение сигнал/шум.

На рисунке 2 даны графики вероятности пропуска особенности, полученные из (15) от отношения сигнал/шум q для значений пороговой константы $C_{th}=2,998$ ($P_{лт}=1\%$, маска 3x3), $C_{th}=2,624$ ($P_{лт}=1\%$, маска 4x4), $C_{th}=2,4944$ ($P_{лт}=1\%$, маска 5x5).

Как и следовало ожидать, с ростом значения отношения сигнал/шум эффективность робастного обнаружителя растёт при обнаружении особенности при фиксации вероятности ложной тревоги. Так, например, при $P_{проп}=0.1$ для обнаружения особенности с маской 5x5 необходимо отношение

сигнал/шум не менее 1.9, для особенности с маской 4x4 отношение сигнал/шум должно быть не менее 2.2 (больше на 15%), тогда как для особенности с маской 3x3 отношение сигнал/шум должно быть не менее 3 (больше на 57%).

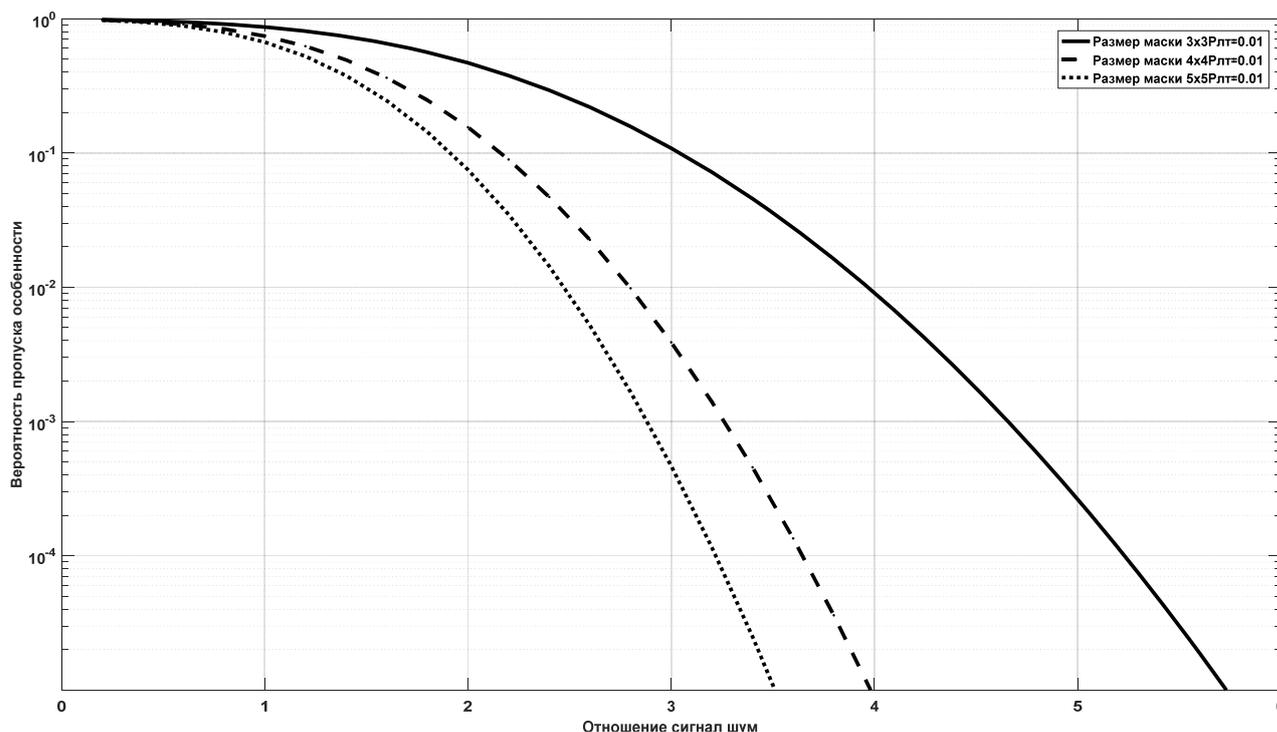


Рис. 2. – Графики зависимости вероятности пропуска особенности от отношения сигнал/шум для размеров маски 3x3, 4x4, 5x5

Оценивая результаты, приведённые на рисунке 3 можно сделать вывод, что при неизменных условиях наблюдения, что характерно изменениям параметров наблюдаемой сцены во времени, большей эффективностью обладают обнаружители с большим размером маски (обеспечивается меньшая вероятность пропуска при равном отношении сигнал/шум). Однако в реальных системах технического зрения возможно изменение условий наблюдения в пределах наблюдаемого кадра, а не только между отдельными кадрами, получаемыми в процессе работы системы.

Исследование устойчивости и эффективности робастного обнаружителя при неравномерном изменении интенсивности по полю.

Устойчивость робастного алгоритма обнаружения точечной особенности доказана ранее в [2], [4], [6], используя моделирование в пакете MATLAB для различных видов опорной и анализируемой выборок для нормального закона распределения интенсивности.

Δ	Δ	2Δ	3Δ	4Δ
Δ	2Δ	3Δ	4Δ	5Δ
2Δ	3Δ	4Δ	5Δ	6Δ
3Δ	4Δ	5Δ	6Δ	7Δ
4Δ	5Δ	6Δ	7Δ	8Δ

Рис. 3. –Формирование тестовой сцены для моделирования эффективности робастного обнаружителя.

Элементы тестовой сцены формируются в соответствии с нормальным законом распределения с математическим ожиданием $m_0 = 32$ и среднеквадратичным отклонением $\sigma = 8$. Интенсивность в месте расположения сигнальных элементов увеличивается на m_e . Затем, как показано на рисунке 4, в зависимости от координаты текущего элемента его интенсивность увеличивается на произведение суммы координат элемента (номер строки и столбца) на приращение Δ которое в рамках модели изменяется от 0.01 до 2. Для каждого набора параметров проводится 500000 статистических испытаний. Вероятность ложной тревоги выбрана одинаковой и равной 10^{-2} , что обеспечивается выбором пороговой константы. На рисунке 4 представлены результаты моделирования вероятности ложной тревоги для робастного обнаружителя для масок размером $3 \times 3, 4 \times 4, 5 \times 5$.

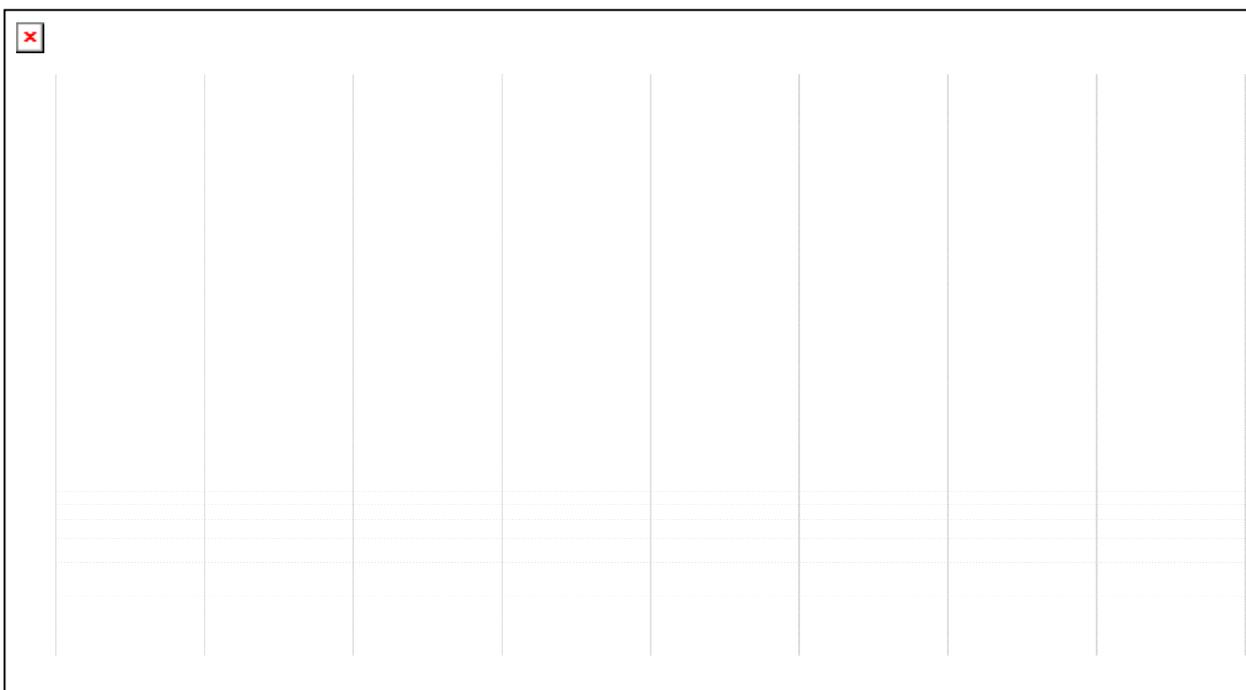


Рис. 4. – Результаты моделирования устойчивости робастного обнаружителя. Как можно заметить из рисунка 4 вероятность ложной тревоги быстрее всего снижается при размере особенности 5x5, медленнее всего для размера особенности 3x3. Снижение вероятности ложных тревог на порядок до $P_{ЛТ} = 10^{-3}$ достигается для особенности 5x5 при значении сдвига интенсивности равном 0.18, для особенности 4x4 при сдвиге интенсивности равном 0.22 (на 22% больше), а для особенности 3x3 при сдвиге интенсивности равном 0.29 что на 62% больше чем в случае особенности 3x3. Моделирование демонстрирует, что несмотря на наличие изменений вероятности ложных тревог $P_{ЛТ}$ на два порядка (от 10^{-2} до 10^{-4}) она не превышает заданное значение вероятности ложной тревоги $P_{ЛТ.зад} = 10^{-2}$. Это свидетельствует о важном свойстве робастного алгоритма обнаружения – устойчивости при изменении интенсивности в элементах разложения.

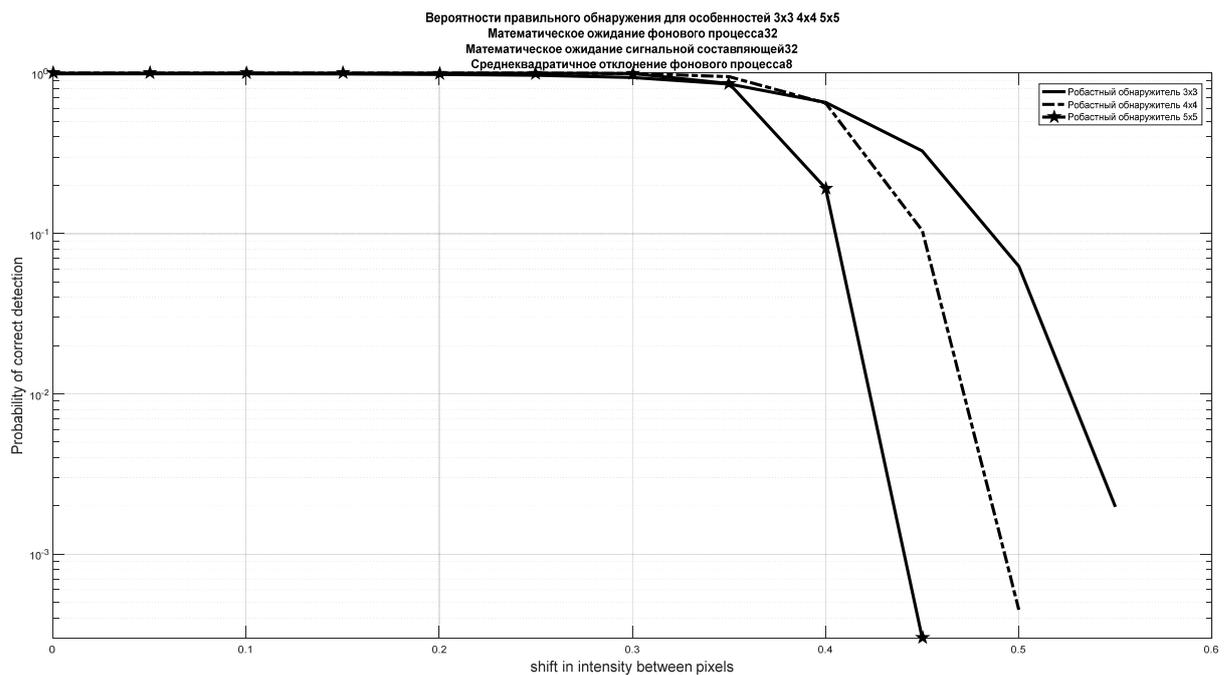


Рис. 5. –Результаты моделирования эффективности робастного обнаружителя

При оценке эффективности робастного обнаружителя на основании графиков представленных на рисунке 6 следует отметить, что $P_{обн} = 0.9$ достигается при $\Delta = 0.405$ для особенности 3x3, при $\Delta = 0.45$ для особенности 4x4, при $\Delta = 0.48$ для особенности 5x5. Выбор наиболее эффективного размера особенности определяется сдвигом интенсивности Δ , так, например, на участке $\Delta \leq 0.3$ наиболее эффективен обнаружитель с маской 5x5, на участке $0.3 \leq \Delta \leq 0.39$ – обнаружитель с маской 4x4, а при $\Delta \geq 0.4$ наибольшей эффективностью обладает обнаружитель с маской 4x4. Таким образом целесообразно осуществлять предварительный анализ обрабатываемого изображения для выбора наиболее эффективного размера маски, из-за того что невозможно дать однозначный ответ о эффективности обнаружения при отсутствии данных о характеристиках исследуемой сцены.

Заключение. Показано что, задача обнаружения разноплановых особенностей на априорно неизвестной сцене предшествующая этапу получения навигационной информации может быть решена посредством использования робастного обнаружителя.

Исходной предпосылкой для синтеза универсального робастного обнаружителя является изображение на поверхности ПЗС-матрицы размером 5x5 пикселей. В каждом пикселе содержится информация об интенсивности сигнала, накопленной за время наблюдения. Формируются сигнальная и опорная шумовая выборки. В решаемой задаче неизвестная дисперсия интенсивности является мешающим параметром. Информативным параметром выступает математическое ожидание интенсивности в сигнальных пикселях.

Доказано существование равномерного наиболее мощного инвариантного алгоритма на основе t -критерия. Синтезировано решающее правило выделения особенностей на участке сцены размером 3x3, 4x4, 5x5 пикселей.

Доказана устойчивость предлагаемого алгоритма выделения особенностей изображения к изменениям математического ожидания и СКО интенсивности фоновых пикселей, а также его устойчивость к сдвигу интенсивности элементов изображения. Универсальность алгоритма обнаружения определяется только количеством сигнальных пикселей в выделяемой особенности. Индивидуальность же особенностей отражается в формировании опорной и анализируемой выборок.

Работа выполнена при поддержке РФФ проект 17-79-10191.

Литература

1. Petrov D., Rumyantsev K. Research of robust feature detector efficiency in case of scene uneven illumination changes. //AIP Conference Proceedings (Vol. 1952). American Institute of Physics Inc. DOI: doi.org/10.1063/1.5032062
 2. Petrov D., Rumyantsev K. Analysis of the effectiveness of the robust contrast feature detector // ICMIP 2017. Wuhan: IEEE, 2017a. pp. 43–47.
 3. Petrov D., Rumyantsev K. Analysis of the effectiveness of the robust contrast feature detector // ICMIP 2017. Wuhan: IEEE, 2017b. pp. 2300–2335.
 4. Rice J. a. Mathematical Statistics and Data Analysis. , 1995. 330 p.
 5. Rumyantsev K., Petrov D. Detection of feature points on the three-dimensional scene under varying conditions of observation // Chinese Control Conference, CCC. , 2015. pp. 4547–4551.
 6. Trujillo L., Olague G. Automated Design of Image Operators that Detect Interest Points // Evol. Comput. 2008. V. 16. № 4. pp. 483–507.
 7. Rumyantsev K. E., Petrov D.A. Universal robust algorithm for detection of features on a scene // Izv. SFEDU. Eng. Sci. 2015a. V. 8. № 170. pp. 119–137.
 8. Rumyantsev K. E., Petrov D.A. Informativity of natural halftone landscapes // Fundam. Res. 2015b. V. 5. pp. 329–334.
 9. Строев В.М., Альмас Г.Ф. Многоспектральный оптический метод формирования и обработки изображений низкоконтрастных подкожных образований при априорной неопределенности параметров кожи // Инженерный вестник Дона, 2013, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2018.
 10. Воронин В.В., Сизякин Р.А., Гапон Н.В., Франц В.А., Колосов А. Ю. Алгоритм реконструкции изображений на основе анализа локальных бинарных окрестностей // Инженерный вестник Дона, 2013, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1857.
-

References

1. Petrov, D., Rumyantsev, K. Research of robust feature detector efficiency in case of scene uneven illumination changes. AIP Conference Proceedings (Vol. 1952). American Institute of Physics Inc. DOI: doi.org/10.1063/1.5032062
2. Petrov D., Rumyantsev K. Analysis of the effectiveness of the robust contrast feature detector ICMIP 2017. Wuhan: IEEE, 2017a. pp. 43–47.
3. Petrov D., Rumyantsev K. Analysis of the effectiveness of the robust contrast feature detector ICMIP 2017. Wuhan: IEEE, 2017b. pp. 2300–2335.
4. Rice J. a. Mathematical Statistics and Data Analysis, 1995. 330 p.
5. Rumyantsev K., Petrov D. Detection of feature points on the three-dimensional scene under varying conditions of observation. Chinese Control Conference, CCC, 2015. pp. 4547–4551.
6. Trujillo L., Olague G. Automated Design of Image Operators that Detect Interest Points. Evol. Comput. 2008. V. 16. № 4. pp. 483–507.
7. Rumyantsev K. E., Petrov D.A. Izv. SFEDU. Eng. Sci. 2015a. V. 8. № 170. pp. 119–137.
8. Rumyantsev K. E., Petrov D.A. Fundam. Res. 2015 b. V. 5. pp. 329–334.
9. Stroev V.M., Al'mas G.F. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2013, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2018.
10. Voronin V.V., Sizyakin R.A., Gapon N.V., Frants V.A., Kolosov A. Yu. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2013, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1857.