

ИКОНИКА – НАУКА ОБ ИЗОБРАЖЕНИИ

004.932.2, 517.968

АВТОМАТИЧЕСКАЯ ВЕЙВЛЕТ-СЕГМЕНТАЦИЯ ФОНОЦЕЛЕВОГО КАДРА ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО ПРИБОРА ПРИ ОБНАРУЖЕНИИ ДИНАМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ НА 2D ИЗОБРАЖЕНИИ

© 2016 г. А. Н. Катулев, доктор техн. наук; А. А. Храмичев, канд. техн. наук

Научно-исследовательский центр Центрального научно-исследовательского института войск Воздушно-космической обороны Минобороны России, г. Тверь, Россия

E-mail: nisrivotver@mail.ru

Предложен адаптивный инвариантный метод автоматической сегментации фоноцелевого кадра оптико-электронного прибора при обнаружении динамических объектов на изображении. Метод основан на применении вейвлет-преобразования изображения с оптимальной в смысле принципа Неймана–Пирсона пороговой обработкой вейвлет-коэффициентов по локальному наиболее мощному несмещенному критерию. Для реализации метода не требуется введения априорных данных о фоноцелевой обстановке, в том числе эталонных изображений динамических объектов, местоположения и размеров окон при обнаружении объектов. Используется только информация, содержащаяся в регистрируемых оптико-электронным прибором изображениях. Приведены алгоритм и результаты оценки показателей качества сегментации нестационарных (и стационарных) изображений в различных условиях функционирования. Установлена высокая эффективность метода и его реализуемость в реальном времени.

Ключевые слова: оптико-электронный прибор, изображение, сегментация, окно, нестационарный фон, динамический объект.

Коды OCIS: 100.0100; 100.2000; 110.3960; 100.2000.

Поступила в редакцию 20.03.2015.

Актуальность

В классической теории цифровой обработки 2D изображений [1–4] и других работах [5–9] важное место занимает раздел сегментации – разбиения изображений на непересекающиеся фрагменты. Степень детализации сегментации зависит от решаемых задач. Для этого используют маски-окна, например маски Превитта, Собела, Робертса, лапласиан-гауссiana и др. с размерами, устанавливаемыми исследователем задачи; применяют операцию дифференцирования изображения [6]. Вводят также эталоны, они составляют необходимую часть исходных данных, например при решении задачи локализации малоразмерных объектов на 2D изображении [10].

Необходимость сегментации подтверждена результатами моделирования по реальным экспериментальным данным о фоноцелевой, в частности воздушной, обстановке в зоне контроля оптико-электронного прибора (ОЭП). Воздушная обстановка нестационарная, поэтому сегментация должна быть адаптивной и осуществляться автоматически.

Установлено, что ситуации “Динамический объект (ДО) на фоне ясного неба”, “ДО на фоне облаков”, “ДО отсутствует в контролируемом пространстве” (имеет место ситуация “ясное небо” либо ситуация “сплошная (рваная) облачность”) представимы на изображениях фоноцелевых кадров ОЭП статистическими мультифракталами [11]. Мультифрактал есть объединение непересекающихся неоднородных фракталов

самых различных компактных конфигураций. Такие конфигурации порождаются оптическим излучением как одновременно находящихся в зоне контроля ОЭП различных ДО, так и фона. При этом изображение собственно ДО может быть пространственно протяженным либо “точечным” – пространственно малоразмерным, контраст изображения – как положительным, так и отрицательным, а фон при каждой ситуации может быть стационарным фракталом или нестационарным – мультифракталом. Фон всегда порождает аппликативную мультифрактальную помеху на изображении [12, 13].

Мультифрактальному изображению свойственны разрывы яркостей (перепады), т.е. свойственны неоднородность (нестационарность) пространственно-частотного наполнения и локальные пространственные однородности яркостей пикселов.

Из мультифрактальности изображения объективно следуют перечисленные ниже положения.

1. Информация о ДО сосредоточена в связной части изображения – кластере пикселов. Положение такого кластера на исходном изображении априори неизвестно.

2. Основными характеристиками статистически мультифрактальной структуры изображения являются нестационарность спектра (совоупности) фрактальных размерностей и пространственных статистических текстурных характеристик: пространственных автокорреляционных матриц яркостей пикселов кластеров изображения и пространственно-частотных спектральных плотностей мощности яркостей кластеров.

Фрактальные и энергетические характеристики не коррелированы. Спектральные плотности хорошо аппроксимируются степенным законом (подтверждается мультифрактальная структура изображения [14] и связь фрактальных характеристик со спектральными плотностями) и не зависят от знака контраста.

3. Имеет место устойчивость тенденции изменения значения фрактальной размерности в направлении увеличения для ситуаций “ДО на фоне ясного неба”, “ДО на фоне облаков” по сравнению с ее значениями для ситуации “ДО отсутствует в зоне контроля”; эта тенденция не зависит от знака контраста [15]. При этом имеют место также изменения пространственной автокорреляционной матрицы и спектральной плотности мощности кластеров изображений ДО.

При отсутствии в контролируемом пространстве ДО и воздействий на ОЭП оптического излучения от облаков или других фоновых объектов автокорреляционная матрица изображения соответствует квазипостоянной пространственной последовательности яркостей, а фрактальная размерность – размерности естественного безоблачного небосвода.

4. В кластерах с изображениями истинных ДО не имеется ложных ДО, порожденных фоном. Ложные целеподобные кластеры (изображения) могут появляться равновероятно в разных областях фоноцелевого кадра.

Названные кластеры не содержат информации о форме ДО.

Очевидно, эти результаты обуславливают необходимость проведения анализа и обработки изображения с мультифрактальной структурой покластерно, одновременно и независимо на различных масштабах. То есть при условии сегментации изображения на кластеры различных размеров прямоугольного вида, целесообразно, чтобы формально обеспечивалась возможность вычисления пространственных статистических текстурных характеристик. Размеры окон априори неизвестны. Они должны формироваться автоматически, иметь минимальные площади “охвата” соответствующих кластеров и быть адаптированы к ним, чтобы по информации каждого окна можно было в автоматическом режиме принять надежное решение об обнаружении в нем или отсутствии ДО.

В известных работах к настоящему времени не имеется метода автоматической сегментации 2D изображений, реализующего требования по адаптивности и минимальности площади окна “охвата” каждого кластера, содержащего информацию о ДО.

Применяемые приемы сегментации изображений сложной структуры основаны на идеи построения скользящего окна с использованием метрики-расстояния вида $\rho = |i - h| + |j - k|$ или вида $d = \max\{|i - h|, |j - k|\}$ на изображении, где i, j – координаты центра окна. Значения ρ, d устанавливаются, как правило, априори оператором и поэтому не удовлетворяют требованиям их адаптивности к различным кластерам изображений и их размерам. Предпочтение отдается окну $\rho = |i - h| + |j - k|$ [1–4].

В связи с этим возникает актуальная научно-техническая задача разработки автоматически реализуемого метода оптимальной сегментации, адаптивного к структуре каждого т-

кущего изображения, подлежащего обработке с целью обнаружения на нем одиночного или, в общем случае, нескольких ДО.

Под оптимальной сегментацией изображения фоноцелевого кадра ОЭП при автоматическом обнаружении ДО понимается его разбиение на непересекающиеся кластеры, каждый из которых накрывается прямоугольным окном с минимальной площадью. Окна должны содержать информацию в виде фрактальной размерности, пространственной автокорреляционной матрицы и пространственно-частотной спектральной плотности мощности яркостей пикселов изображения как минимальных достаточных статистик обнаружения ДО.

Цель работы

- Разработка вейвлет-адаптивного метода оптимальной сегментации изображений посредством локализации однородных кластеров на текущих мультифрактальных нестационарных фоноцелевых кадрах ОЭП;
- при обнаружении ДО последующее формирование прямоугольных окон с минимальными площадями “охвата” пространственно локализованных кластеров;
- оценка характеристик качества функционирования алгоритма метода в автоматическом режиме.

Теоретические положения метода сегментации

В основу теоретических положений метода оптимального выделения кластеров изображений и построения “охватывающих” их окон с минимальными площадями на фоноцелевом кадре ОЭП примем как исходные, дополнительно к отмеченным выше результатам моделирования [1–4], следующие объективно существующие закономерности [15, 16]:

- априори неопределенность относительно текущего состояния воздушной обстановки в зоне контроля ОЭП;
- ДО затеняет некоторую часть фонового облачного небосвода;
- изображение ДО на фоноцелевом кадре ОЭП формируется на фоне аппликативных помех, порождаемых оптическим излучением облаков, ясного неба и других фоновых источников;
- конфигурация изображения ДО на фоноцелевом кадре случайна и априори неизвестна;

– аппликативные помехи могут обуславливать целеподобные изображения по минимальным достаточным статистикам обнаружения ДО, конфигурации целеподобных изображений не совпадают с конфигурациями изображений ДО;

– изображение на фоноцелевом кадре ОЭП в целом нестационарно со сложной структурой, изображения на последовательности фоноцелевых кадров ОЭП представляют выборки нестационарного случайного пространственно-временного процесса;

– пространственно-частотные спектры оптического излучения ДО, целеподобных изображений и изображений помехового фона ограничены по энергии и локализованы в пространственно-частотном диапазоне;

– изображения на фоноцелевом кадре ОЭП от группы ДО могут не перекрываться, иметь разные размеры и локализовываться в априори неизвестных частях фоноцелевого кадра;

– на очередном фоноцелевом кадре количество и формы изображений-конфигураций могут изменяться по сравнению с предыдущим кадром; их прогнозирование не представляется возможным.

Утверждение

При таких объективных закономерностях и результатах моделирования оптимальная сегментация изображения при автоматическом обнаружении ДО на каждом текущем фоноцелевом кадре обеспечивается посредством порогового по критерию Неймана–Пирсона выделения кластеров, содержащих изображения о ДО в зоне контроля ОЭП и/или целеподобные изображения с использованием одномерных вейвлет-преобразований строк и столбцов фоноцелевого кадра.

Доказательство

Поскольку искомые кластеры должны локализовываться в пространственной системе координат фоноцелевого кадра, иметь собственные фрактальные размерности и пространственные статистические текстурные характеристики, то доказательство утверждения сводится к раскрытию метода сегментации, обладающего следующими свойствами оптимальности:

- высокой пространственной и частотной разрешающей способностью,

- локализации изображений ДО, в том числе и целеподобных, на компактных множествах – кластерах пикселов фоноцелевого кадра ОЭП,
- обеспечения максимального отношения “пикового значения яркости кластера с изображением ДО к шуму”.

Первое из названных свойств реализуется только при выполнении сегментации изображения с использованием одномерных вейвлет-преобразований строк и столбцов фоноцелевого кадра или двумерного вейвлет-преобразования, практически сводящегося к выполнению двух одномерных.

Действительно, как известно, в отличие от классического и короткого фурье-преобразования [17–19] вейвлет-преобразование (одномерное или двумерное) при полном выполнении требований принципа неопределенности [20] (принципа, ограничивающего достижимую степень концентрации энергии по пространству и частоте одновременно) фиксирует с высокой точностью локальные изменения – неоднородности (скачки, разрывы первого рода, перепады) структуры исследуемого изображения (строки, столбца, фоноцелевого кадра в целом) как в частотной, так и в пространственной (временной) областях. В результате в этих областях обеспечивается разрешение различных близких изображений в виде компактных кластеров пикселов на фоноцелевом кадре ОЭП. При этом могут быть выделены изображения ДО и целеподобные изображения, обусловленные оптическим излучением фона. Это происходит потому, что вейвлет-преобразование реализуется без введения априорной информации о текущем состоянии воздушной обстановки в зоне контроля ОЭП.

Вейвлет-преобразование, пусть двумерное, по определению представляется операцией скалярного произведения $\zeta_{mk} = (f(x, y), \psi_{mk}(x, y))$ двумерной случайной функции $f(x, y)$ изображения на двумерную вейвлет-функцию

$$\begin{aligned}\Psi_{mk}(x, y) &= \Psi_{m_x m_y k_x k_y}(x, y) = \\ &= \frac{1}{\sqrt{m_x m_y}} \Psi\left(\frac{x - k_x}{m_x}, \frac{y - k_y}{m_y}\right),\end{aligned}$$

где $(x, y) (x, y) \in X \times Y$, X, Y – упорядоченное множество пикселов в строке и столбце соответственно, $m = (m_x, m_y)$ – переменные масштаба, $k = (k_x, k_y)$ – переменные сдвига по строке и столбцу пикселов фоноцелевого кадра, ζ_{mk} – вейвлет-коэффициенты, представляющие в пя-

тимерном пространстве вейвлет-преобразование в целом.

Вейвлет-коэффициенты при каждом значении $k_x \in X, k_y \in Y, m_x, m_y > 0$ есть реализации нормально распределенной случайной величины. Нормализация непосредственно обуславливается структурой скалярного произведения в виде интегрального преобразования изображения как реализаций двумерного случайного процесса [21].

Теперь становится необходимым вычислить вейвлет-коэффициенты проверить на принадлежность ситуации нахождения ДО в зоне контроля ОЭП (ситуация H_1) или альтернативной ситуации (ситуация H_2): отсутствие ДО – в зоне контроля ОЭП только сложный фон. Соответствующее правило проверки построим, учитывая, что вейвлет-коэффициенты подчинены нормальному распределению как при одной, так и при альтернативной ситуации. В связи с этим сформируем соответствующие функции правдоподобия $f(\zeta_{km} | H_1)$, $f(\zeta_{km} | H_2)$, предварительно установив для них по результатам обработки экспериментальных данных по типовым фоноцелевым сценам-ситуациям первые два момента. Так, в ситуации нахождения ДО в зоне контроля ОЭП математические ожидания вейвлет-коэффициентов равны нулю, дисперсии принимают значения в интервале 5–31. При отсутствии ДО в зоне контроля ОЭП математическое ожидание вейвлет-коэффициентов также равно нулю, а дисперсия принимает значение в интервале 3–27. Отсюда видно, что ситуации по существу близкие, значит, правило проверки вейвлет-коэффициентов следует формировать для наименее благоприятных случаев сегментации изображения на кластеры. Поэтому для принятия решения о принадлежности каждого вейвлет-коэффициента изображения кластеру с ДО воспользуемся локальным наиболее мощным несмещенным критерием.

Такой критерий непосредственно выводится из отношения правдоподобия [22, 23] вида

$$\begin{aligned}\ln \frac{f(\zeta_{km} | \sigma + \delta)}{f(\zeta_{km} | \sigma)} &= \ln f(\zeta_{km} | \sigma + \delta) - \ln f(\zeta_{km} | \sigma) \approx \\ &\approx \frac{\partial \ln f(\zeta_{km} | \sigma)}{\partial \sigma} \delta = \frac{\partial \ln \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left\{-\frac{\zeta_{km}^2}{2\sigma^2}\right\}}{\partial \sigma} \delta = \\ &= -\frac{1}{\sigma} \delta + \frac{\zeta_{km}^2}{\sigma^3} \delta \geq \ln \Pi(\alpha).\end{aligned}$$

и представляется выражением

$$\zeta_{km}^2 \geq \sigma^3 / (\delta \ln \Pi(\alpha)) + \sigma^2,$$

где δ – малая величина отклонения параметра σ_1 гипотезы нахождения ДО в зоне контроля ОЭП от аналогичного параметра σ альтернативной гипотезы. Размерность δ совпадает с размерностью σ , ($\sigma_1 = \sigma + \delta$), α – допустимая вероятность формирования вейвлет-коэффициента целеподобного кластера из-за воздействия на ОЭП оптического излучения сложного фона.

Статистика принятия решения ζ_{km}^2 имеет χ^2 -распределение с одной степенью свободы, $\Pi(\alpha)$ – пороговое значение принятия решения определяется по таблице, например [23], или это пороговое значение оптимального включения вейвлет-коэффициента в кластер по критерию Неймана–Пирсона при сегментации изображения.

Из изложенного в качестве вывода можно отметить, что реализация построенного правила усиливает разрешающую способность метода сегментации – выделения кластеров вейвлет-коэффициентов в пространстве переменных сдвига и масштаба – и что при установлении первого свойства метода сегментации одновременно подтверждается и его второе свойство.

Свойство (третье) обеспечения максимального отношения “максимального (пикового значения яркости кластера) с изображением искомого ДО к шуму” устанавливается непосредственно из выражения вейвлет-преобразования как двумерного корреляционного интеграла связи функции изображения с вейвлет-функцией при каждом значениях переменных масштаба и сдвига. При этом корреляция определяется автоматически (при выделении кластеров вейвлет-коэффициентов) с установлением всех ее значений, в том числе и максимального на множестве переменных сдвига и масштаба независимо от формы обрабатываемого изображения.

В этом смысле двумерная корреляционная связь представляет аддитивный инвариантный согласованный фильтр [20], на выходе которого имеет место максимальное отношение значения этой связи к мощности шума.

Двумерный согласованный фильтр реализуется с использованием одномерных вейвлет-преобразований. Этот принцип будет положен в основу построения алгоритма сегментации изображения на фоноцелевом кадре.

Подтвердим справедливость третьего свойства формально. Для этого изображение, иска-

женное аддитивными аппликативной помехой и шумом ОЭП на текущем фоноцелевом кадре (в плоскости приемной апертуры), запишем в виде

$$f(x, y) = \phi(x, y)S(x, y) + B_{\text{back}}(x, y) + n(x, y),$$

где $\phi(x, y)$ – безразмерная функция, описывающая воздействие среды на $S(x, y)$ – оптическое излучение ДО (определяется законом Бугера [12]), $B_{\text{back}}(x, y)$ – яркость фона, $n(x, y)$ – результатирующий шум ОЭП на изображении, $(x, y) \in \Omega$, $\Omega = X \times Y$, (x, y) – целочисленные координаты на фоноцелевом кадре.

В функции изображения $f(x, y)$ не учитывается составляющая фонового излучения атмосферы между ДО и ОЭП.

Затем, воспользовавшись неравенством Коши–Буняковского, введем и оценим метрику отличия функции $f(x, y)$ от функции $\psi_{mk}(x, y)$ при варьировании переменными $k = (k_x, k_y)$ и $m = (m_x, m_y)$ на множествах их значений. Метрику запишем с использованием взаимной корреляционной связи (как корреляционного интеграла) между изображением $f(x, y)$ и вейвлет-функцией $\psi_{mk}(x, y)$.

При этом считаем, что функции $f(x, y)$ и $\psi_{mk}(x, y)$ ненулевые и интегрируемы, т.е. принадлежат пространству L_2 [24]. Выражение взаимной корреляционной связи записываем в виде

$$K_{f\psi}[k, m] = \sum_{x \in X} \sum_{y \in Y} f(x, y) \psi_{mk}(x, y),$$

а выражение метрики – в виде

$$\max_{k_x \in X, k_y \in Y, m_x > 0, m_y > 0} K_{f\psi}[k_x, k_y, m_x, m_y].$$

Действительно, минимальное отличие изображения ДО (или целеподобного изображения) от вейвлет-функции будет иметь место только при достижении максимальной корреляции между ними, что и достигается операцией \max по $k_x \in X, k_y \in Y, m_x > 0, m_y > 0$. Естественно, при высокой чувствительности вейвлетов к неоднородности структуры исходного изображения будет определено в общем случае несколько локальных максимумов, каждый из которых будет находиться в каком-то одном из выделяемых кластеров вейвлет-коэффициентов.

Теперь, применив к корреляционной связи неравенство Коши–Буняковского [24] с уче-

том представления функции изображения, получим

$$\begin{aligned}
 \sum_{x \in X} \sum_{y \in Y} f(x, y) \psi_{mk}(x, y) &= \sum_{x \in X} \sum_{y \in Y} \phi(x, y) S(x, y) \psi_{mk}(x, y) + \\
 &+ \sum_{x \in X} \sum_{y \in Y} B_{\text{back}}(x, y) \psi_{mk}(x, y) + \sum_{x \in X} \sum_{y \in Y} n(x, y) \psi_{mk}(x, y) \leq \\
 &\leq \left[\sum_{x \in X} \sum_{y \in Y} \phi^2(x, y) S^2(x, y) \right]^{\frac{1}{2}} \left[\sum_{x \in X} \sum_{y \in Y} \psi_{km}^2(x, y) \right]^{\frac{1}{2}} + \\
 &+ \left[\sum_{x \in X} \sum_{y \in Y} B_{\text{back}}^2(x, y) \right]^{\frac{1}{2}} \left[\sum_{x \in X} \sum_{y \in Y} \psi_{km}^2(x, y) \right]^{\frac{1}{2}} + \\
 &+ \left[\sum_{x \in X} \sum_{y \in Y} n^2(x, y) \right]^{\frac{1}{2}} \left[\sum_{x \in X} \sum_{y \in Y} \psi_{km}^2(x, y) \right]^{\frac{1}{2}}.
 \end{aligned}$$

Здесь отметим, что шум $n(x, y)$ ОЭП – нормальный, и представляется составляющими, гармониками с малыми амплитудами, имеющими одинаковые (близкие) среднеквадратические значения для всех частот. Такие гармоники должны сильно ослабляться вейвлет-функциями, при которых достигается максимум корреляции между ними и изображением ДО. Это естественное требование [25], иначе на фonoцелевом кадре ОЭП будет обнаруживаться недопустимо большое количество ложных шумовых изображений, т.е. корреляционная связь вида $\sum_{x \in X} \sum_{y \in Y} n(x, y) \psi_{km}(x, y)$ должна быть не-значительной при

$$\max_{k_x \in X, k_y \in Y, m_x > 0, m_y > 0} K_{f\psi}[k_x, k_y, m_x, m_y].$$

Поэтому в левой и правой частях неравенства Коши–Буняковского достаточно учитывать только первые два слагаемых выражения для изображения. Но эти слагаемые, в свою очередь, могут проявляться одновременно в разных частях фonoцелевого кадра. Это объясняется тем, что, как было отмечено выше, ДО затеняет некоторую часть фонового облачного небосвода, оптическое излучение атмосферы между ДО и ОЭП незначительно, а оптическое излучение аппликативного фона не “накладывается” на оптическое излучение ДО.

В связи с этим при одном и том же значении переменной масштаба, но при разных значениях переменной сдвига вейвлет-функций на разных непересекающихся частях фonoцелевого кадра одновременно могут проявляться кластеры с изображениями ДО и кластеры с целеподобными изображениями либо только изо-

брожения ДО, либо только целеподобные изображения (при отсутствии ДО в зоне контроля ОЭП). При этом, как было отмечено, операция

$$\max_{k_x \in X, k_y \in Y, m_x > 0, m_y > 0} K_{f\psi}[k_x, k_y, m_x, m_y]$$

реализуется автоматически в каждой из этих возможных ситуаций функционирования ОЭП, тем самым обеспечивая адаптацию вейвлет-функций к структуре изображения фonoцелевого кадра.

Теперь имеются основания утверждать, что найдутся такие совокупности значений $k_x^*, k_y^*, m_x^*, m_y^*$ переменных $k_x \in X, k_y \in Y$ и $m_x, m_y > 0$, при которых будет выполнено условие локальной тождественности вычисленной корреляционной связи $K_{f\psi}[k_x^*, k_y^*, m_x^*, m_y^*]$ выходу “своего” согласованного фильтра с точностью до некоторой мультипликативной константы. В рассматриваемом случае это условие для каждого четверок $(k^*, m^*) = (k_x^*, k_y^*, m_x^*, m_y^*)$ записывается в виде одного из равенств

$$\phi(x, y) S(x, y) = C_1 \psi_{k^* m^*}(x, y),$$

$$B_{\text{back}} = C_1 \psi_{k^* m^*}(x, y);$$

равенство $\phi(x, y) S(x, y) \wedge B_{\text{back}} = C_2 \psi_{k^* m^*}(x, y)$, где \wedge – обозначение “и”, не реализуемо, так как ДО затеняет фон.

При выполнении какого-либо из равенств в процессе обработки изображения фonoцелевого кадра на выходе рассмотренного вейвлет-коррелятора как согласованного фильтра будет иметь место максимальное отношение полезного от ДО и/или целеподобного (фонового) изображения к шуму ОЭП. Это означает справедливость утверждения третьего свойства метода сегментации.

В результате из совокупности установленных трех свойств следует вывод в целом об оптимальности, инвариантности и адаптивности изложенного метода выделения кластеров как непересекающихся множеств пикселов яркостей изображения текущего фonoцелевого кадра.

Доказательство утверждения завершено. Выделенные кластеры представляют собой результат сегментации поля вейвлет-коэффициентов изображения фonoцелевого кадра. Затем они отображаются однозначно в двумерное пространство координат пикселов исходного фonoцелевого кадра со значениями их яркостей оптического излучения, принятого ОЭП, т.е. на фonoцелевом кадре выделяются кластеры пикселов

с яркостью оптического излучения либо от ДО, либо от фона в зоне контроля.

Такие кластеры необходимо (для последующей фильтрации целеподобных изображений по их пространственно-корреляционным характеристикам) “накрыть” прямоугольными окнами с минимальными площадями. Фрактальные же характеристики могут рассчитываться и непосредственно по выделенным структурам кластеров.

Отметим, что искомые прямоугольные окна достаточно просто восстанавливаются по результатам фиксации граничных левого $-y_{lj}$ и правого $-y_{rj}$ столбцов вейвлет-коэффициентов каждого кластера $j = 1, \dots, L$ и его граничных верхней $-x_{uj}$ и нижней $-x_{dj}$ строк вейвлет-коэффициентов. Записываются окна (в координатах фоноцелевого кадра) в виде

$$y \geq y_{lj}, y \leq y_{rj}, x \leq x_{uj}, x \geq x_{dj};$$

затем по этим результатам вычисляются координаты геометрического центра j -го кластера

$$y_r = (y_{lj} + y_{rj})/2, x_d = (x_{uj} + x_{dj})/2.$$

Из построения прямоугольников непосредственно видно, что каждый из них представляет реализацию выпуклой оболочки и поэтому имеет минимальную площадь “охвата” соответствующего кластера.

Алгоритм сегментации изображения фоноцелевого кадра

Алгоритм включает перечисленные ниже операции.

1. Оцифровка изображения текущего фоноцелевого кадра ОЭП и формирование двумерного массива яркостей пикселов с координатами (x_i, y_j) , $i = 1, \dots, M$, $j = 1, \dots, N$, x_i – индекс строки, y_j – индекс столбца, M , N – количество пикселов в строке и столбце соответственно. Полагаем, что количество пикселов представляется целыми степенями основания два.

2. Вычисление вейвлет-коэффициентов вейвлета Хаара каждой строки в зависимости от изменения переменных сдвига $k_j \in N$ и масштаба $m_j > 0$.

3. Пороговое преобразование вычисленных вейвлет-коэффициентов строки: отбор вейвлет-коэффициентов, превышающих пороговое значение, установленное по критерию Неймана–Пирсона для допустимой вероятности вычисления ложного вейвлет-коэффициента (из-за воз-

действия на ОЭП оптического излучения только фона).

4. Поиск в каждой строке локальных максимальных и минимальных вейвлет-коэффициентов по переменным масштаба и сдвига методом типа Хука–Дживса с лебеговым разбиением области значений вейвлет-коэффициентов.

5. Определение для каждого локального максимального вейвлет-коэффициента строки по переменной сдвига ближайших слева и справа локальных минимальных вейвлет-коэффициентов.

6. Определение по переменной сдвига для каждого максимального локального вейвлет-коэффициента окрестности значений вейвлет-коэффициентов между значениями ближайших слева и справа локальных минимальных вейвлет-коэффициентов строки.

7. Установление признака соответствия окрестностей i -й и $(i + 1)$ -й строки по их множественному пересечению по переменной сдвига.

8. Идентификация пар окрестностей с локальными максимальными вейвлет-коэффициентами i -й и $(i + 1)$ -й строк с признаком их соответствия.

Идентификация выполняется по непараметрическому критерию однородности Колмогорова [22, 23]

$$\sqrt{N_0} D_{N_i N_{i+1}} \leq d_{0\alpha}(N_i N_{i+1}), \quad N_0 = \frac{N_i N_{i+1}}{N_i + N_{i+1}},$$

$$D_{N_i N_{i+1}} = \sup_{\zeta_{km}} |F_i(\zeta_{km}) - F_{i+1}(\zeta_{km})|,$$

где ζ_{km} – вейвлет-коэффициенты в i -й и $(i + 1)$ -й строках фоноцелевого кадра, N_i , N_{i+1} – объемы-выборки окрестностей локальных максимумов вейвлет-коэффициентов i -й и $(i + 1)$ -й строк, $d_{0\alpha}(N_i N_{i+1})$ – критическая точка распределения статистики $\sqrt{N_0} D_{N_i N_{i+1}}$, иначе, $d_{0\alpha}(N_i N_{i+1}) = \sqrt{N_0} D_{N_i N_{i+1}}$, $N_0 \geq 20$ при уровне значимости α (вероятности отклонения идентификации вейвлет-коэффициентов строк, $\alpha = 1 - (K(d_{0\alpha}(N_i N_{i+1})))$, $K(d_{0\alpha}(N_i N_{i+1})) = \sum_k (-1)^k \exp\{-2k^2 d_{0\alpha}^{-2}\}$ – закон Колмогорова, $F_i(\zeta_{km})$, $F_{i+1}(\zeta_{km})$ – интегральные выборочные функции распределения вероятностей вейвлет-коэффициентов в $(i, i + 1)$ смежных строках текущего фоноцелевого кадра.

При невыполнении критерия $\sqrt{N_0} D_{N_i N_{i+1}} \leq d_{0\alpha}(N_i N_{i+1})$ принимается решение об отклонении идентификации выборок вейвлет-коэффициентов окрестностей i -й и $(i + 1)$ -й строк фоноцелевого кадра.

Заметим, что такой прием идентификации есть не что иное, как реализация необходимого и достаточного условия близости окрестностей строк (столбцов) по отношению стохастической эквивалентности [26].

9. Формирование кластеров идентифицированных окрестностей локальных максимальных вейвлет-коэффициентов строк фonoцелевого кадра.

10. Выполнение операций 2–9 для столбцов изображения фonoцелевого кадра.

11. Вычисление множественного пересечения кластеров вейвлет-коэффициентов строк и столбцов с последующим формированием – обнаружением (при пересечении не менее 90% вейвлет-коэффициентов кластеров строк и столбцов) кластеров вейвлет-коэффициентов в целом текущего фonoцелевого кадра.

12. Построение выпуклых оболочек в виде прямоугольных окон, накрывающих соответствующие кластеры вейвлет-коэффициентов.

13. Преобразование-отображение построенных операций 12 выпуклых оболочек кластеров вейвлет-коэффициентов в выпуклые оболочки – прямоугольные окна яркостей пикселов фonoцелевого кадра.

14. Вычисление фрактальных размерностей кластеров яркостей пикселов фonoцелевого кадра.

15. Вычисление корреляционных матриц окон яркостей пикселов фonoцелевого кадра и максимальных собственных значений корреляционных матриц.

16. Формирование результатов операций 14 и 15 для алгоритма обнаружения ДО, изложенного в [27].

Характеристики качества алгоритма

Характеристики качества алгоритма оценены математическим моделированием с использованием реальных последовательностей фono-

целевых кадров ОЭП (рис. 1) с изменяющимися условиями обнаружения ДО.

В результате установлено, что алгоритм в автоматическом режиме функционирования обеспечивает

– сегментацию изображения фonoцелевого кадра с однозначной локализацией с единичной вероятностью кластеров структурных особенностей изображения, обусловленных нахождением динамических объектов в зоне контроля ОЭП. При этом в сложных условиях функционирования ОЭП могут локализовываться с вероятностью, не превышающей 0,25–0,3, цепеподобные кластеры изображений с геометрическими размерами, близкими к размерам выделенных изображений ДО (результат сегментации на рис. 2);

– формирование прямоугольных “окон” с минимальными площадями накрытия локализованных кластеров структурных особенностей пространственно протяженных и малоразмерных контрастных и слабоконтрастных изображений на сложном нестационарном фоне для последующего оценивания фрактальной размерности и максимального собственного значения корреляционной матрицы яркостей пикселов при обнаружении ДО. При этом сформированные окна наряду с изображением истинного или ложного ДО могут содержать 25–35% аппликативного фона. На рис. 2 представлены построенные алгоритмом окна на фonoцелевых кадрах, сформированных ОЭП в ситуации “рисунок 1”;

– практически безошибочную идентификацию структурных особенностей изображений по окрестностям вейвлет-коэффициентов строк (столбцов) фonoцелевого кадра с использованием непараметрической статистики критерия однородности Колмогорова. Однако при этом не представляется возможным идентифицировать обнаруженные структурные особенности изображения с изображениями истинных ДО

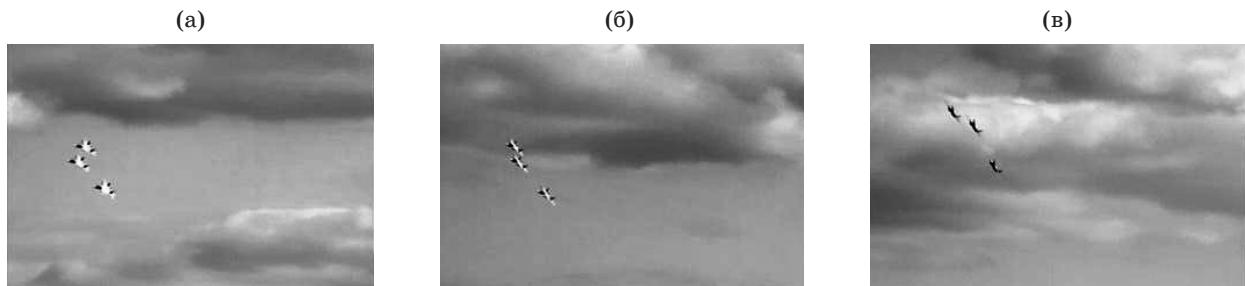


Рис. 1. Фрагмент воздушной обстановки в зоне контроля ОЭП.

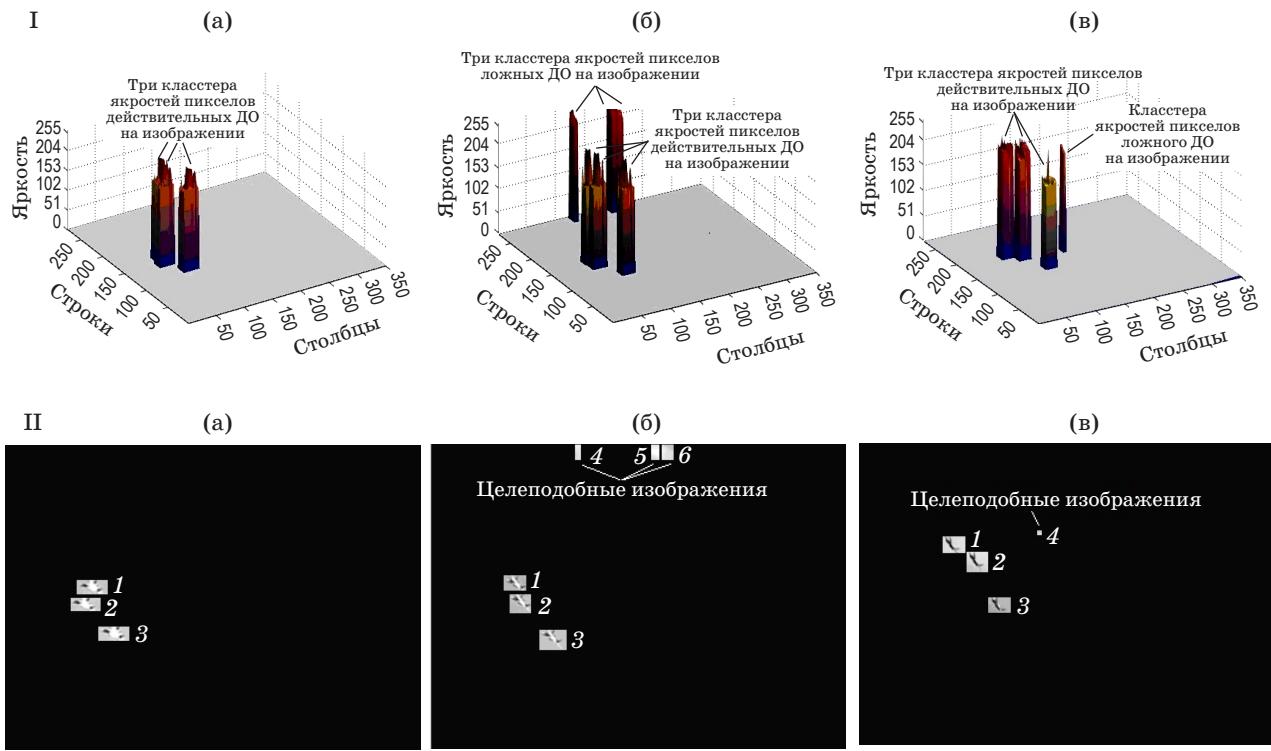


Рис. 2. Результат сегментации: построенные алгоритмом кластеры и накрывающие их окна с изображениями истинных и ложных ДО на реальном фоне. I – выделенные кластеры яркостей пикселов на изображениях. II – построенные окна с изображениями истинных и ложных целей.

или целеподобных изображений, порождаемых только фоном;

- чувствительность к структурным изменениям изображений 2–3 пикселов;
- разрешающую способность 1–3 пикселя или формирование кластеров по изображениям ДО, расстояние между которыми на фоноцелевом кадре составляет 1–3 пикселя;
- формирование по изображениям окон на текущем фоноцелевом кадре опорных двумерных изображений для корреляционного адаптивного обнаружения ДО на очередном фоноцелевом кадре;
- фильтрацию целеподобных изображений, порождаемых нестационарным фоном, с высокой (практически с единичной) вероятностью.

Заключение

В работе теоретически и математическим моделированием обоснован новый эффективный метод решения актуальной проблемы автоматической сегментации фоноцелевых кадров в реальных условиях функционирования ОЭП

при априорной неопределенности характеристик фоноцелевой обстановки.

Предложенный вейвлет-метод вносит вклад в развитие теории и алгоритмов цифровой обработки изображений в интересах обнаружения ДО и оценки текущего состояния контролируемой ОЭП обстановки.

Экспериментально подтверждена высокая чувствительность метода к структурным изменениям изображения фоноцелевого кадра, высокая разрешающая способность изображений ДО, адаптивность определения размеров окна, инвариантность к особенностям полета и визирования ДО.

Автоматически построенное окно полностью “накрывает” изображение соответствующего ДО и имеет при этом минимальную площадь, обеспечивает высокую вероятность фильтрации целеподобных изображений, порождаемых оптическим излучением фона.

Метод реализуем в реальных простых и сложных нестационарных фоновых условиях функционирования ОЭП в реальном времени на современных ЭВМ.

* * * * *

ЛИТЕРАТУРА

1. Розенфельд А. Распознавание и обработка изображений с помощью вычислительных машин. М.: Мир, 1972. 232 с.
2. Прэтт У.К. Цифровая обработка изображений. Кн. 1. Кн. 2. М.: Мир, 1982. 312 с. 480 с.
3. Гонсалес Р., Будс Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2005. 1072 с.
4. Гашников М.В., Глумов Н.И., Ильясова Н.Ю., Мясников В.В., Попов С.Б., Сергеев В.В., Сойфер В.А., Храмцов А.Г., Чернов А.В., Чернов В.М., Чичева М.А., Фуров В.А. Методы обработки изображений / Под ред. Сойфера В.А. М.: ФМЛ, 2003. 784 с.
5. Alper Yilmaz, Khurram Shafique, Mubarak Shah Target tracking in airborne forward looking infrared imagery // *Imagery and Vision Computing*. 2003. V. 21. P. 623–635.
6. Аллатов Б.А., Бабаян П.В., Балашов О.В., Степашкин А.И. Системы автоматического обнаружения и сопровождения объектов. Обработка изображений и управление. М.: Радиотехника, 2008. 176 с.
7. Борзов С.М., Потатуркин О.И. Обнаружение малоразмерных динамических объектов подвижной системы наблюдения // *Автометрия*. 2012. Т. 48. № 1. С. 22–29.
8. Киричук В.С., Косых В.П. Построение многоканального фильтра для обнаружения точечных объектов в изображении, формируемом матричным фотоприемником // *Автометрия*. 2012. Т. 48. № 5. С. 82–92.
9. Борзов С.М. Обнаружение динамических объектов по пространственно-временным аномалиям в видео-последовательностях // *Автометрия*. 2013. Т. 49. № 1. С. 11–17.
10. Донцов А.А., Козирацкий Ю.Л. Алгоритм локализации малоразмерных объектов на изображениях с использованием вейвлет-преобразований // *Автометрия*. 2013. Т. 49. № 2. С. 42–48.
11. Кроновер Р.М. Фракталы и хаос в динамических системах. Основы теории. М.: Постмаркет, 2000. 252 с.
12. Зуев В.Е., Кабанов М.В. Перенос оптических сигналов в земной атмосфере. М.: Советское радио, 1977. 368 с.
13. Федор Е. Фракталы. М.: Мир, 1991. 258 с.
14. Schroder M. *Fractals, Chaos, Power Laws*. Шредер М. Фракталы, хаос, степенные законы. Миниатюры из бесконечного рая. Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика, 2001. 528 с.
15. Катулов А.Н., Колонсков А.А., Храмичев А.А., Ягольников С.В. Адаптивный метод и алгоритм обнаружения малоконтрастных объектов оптико-электронным средством // *Оптический журнал*. 2014. Т. 82. № 2. С. 29–39.
16. Храмичев А.А., Ковалчук М.П., Васильев В.Б. Методика определения пространственно-частотных характеристик фона небосвода // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Спецвыпуск “Антенны и устройства радио- и оптического диапазонов”. Серия “Приборостроение”. 2009. С. 245–252.
17. Петухов А.П. Введение в теорию базисов всплесков. Спб: СПбГТУ, 1999. 132 с.
18. Добеши И. Десять лекций по вейвлетам. Москва-Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика, 2001. 464 с.
19. Яковлев А.Н. Основы вейвлет-преобразования сигналов. М.: САЙНС-ПРЕСС, 2003. 80 с.
20. Свистов В.М. Радиолокационные сигналы и их обработка. М.: Советское радио, 1977. 448 с.
21. Розанов Ю.А. Случайные процессы (краткий курс). М.: Наука, 1971. 288 с.
22. Кокс Д., Хинкли Д. Теоретическая статистика. М.: Мир, 1978. 560 с.
23. Ивченко Г.И., Медведев Ю.И. Математическая статистика. М.: ВШ, 1984. 250 с.
24. Колмогоров А.Н., Фомин С.В. Элементы теории функций и функционального анализа. М.: Наука, 1968. 496 с.
25. Ван Трис Г. Теория обнаружения, оценок и модуляция. Т. 1. М.: Сов. Радио, 1972. 744 с.
26. Фишберн П. Теория полезности для принятия решения. М.: Наука, 1978. 358 с.
27. Гузенко О.Б., Катулов А.Н., Колонсков А.А., Храмичев А.А.. Обнаружение динамического объекта на сложном фоне по точечному слабоконтрастному изображению оптико-электронного прибора // *Оптический журнал*. 2014. Т. 81. № 11. С. 51–61.