

УДК 621.391:519.2

Робастный алгоритм выделения изображения космического объекта на снимке невысокого качества

Шигаев А.К.^{1*}, Лучкин Р.С.^{1}, Машкин М.Н.^{2**}, Тюрин В.С.^{3****}**

¹*Корпорация «Вымпел», 4-я ул.8 Марта, 3, Москва, 125319, Россия*

²*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия*

³*Научно-исследовательский центр ракетных и космических технологий российской академии космонавтики им. К. Э. Циолковского, ул. Пионерская, 16, Королев, Московская область, 141074, Россия*

**e-mail: MSnakeDT@gmail.com*

***e-mail: romluchik@rambler.ru*

****e-mail: mnmashkin@ya.ru*

*****e-mail: vst.17@mail.ru*

Аннотация

Рассматривается алгоритм обработки черно-белых малоконтрастных изображений, решающий задачу выделения области локализации космических объектов (КО) и их идентификации. Разработка алгоритма проведена в условиях существенной априорной неопределённости относительно формы КО и вероятностного описания фоновой обстановки. Вводится критерий качества решения задачи, а также выделяются параметры, оказывающие наибольшее влияние на качество обработки. Приведены примеры обработки реальных изображений.

Ключевые слова: оптическое изображение (ОИ), космический объект (КО), картинная плоскость, алгоритм обработки, медианный фильтр, контур изображения.

Введение

Оптическое изображение (ОИ) содержит гораздо больше информации в сравнении с совокупностью одномерных реализаций некоординатной информации. Однако изображения КО могут быть не только высокого качества, но и низкого. Даже для таких случаев, когда снимки интерпретируются аналитиком неоднозначно, информативность малоконтрастных снимков достаточно высока по сравнению с совокупностью одномерных реализаций, что позволяет более точно решать задачи распознавания при наблюдении удаленного КО. В системах атмосферного видения обработку изображения приходится проводить в условиях, когда неизвестны как вероятностные характеристики фона, так и конструкция, и поведение объекта относительно центра масс (по крайней мере, его ориентация относительно картинной плоскости). В статье синтезируется робастный алгоритм выделения изображения наблюдаемого объекта на малоконтрастном снимке.

Постановка задачи

Исследование структуры совокупности снимков, получаемых в системе пассивной оптической локации, позволяет задачу выделения изображения удалённого КО на снимке сформулировать в следующей постановке.

По распределению яркости (интенсивности) $Y = \{y(r)\}$, полученного в процессе регистрации излучения, на начальном этапе анализа выбрать одну из двух гипотез

$$\Gamma_1 : y(r) = g_0 + N(r) - \text{зафиксировано фоновое излучение}$$

$$\Gamma_2 : y(r) = g_0 + s(r - r_0) + N(r) - \text{на снимке обнаружено изображение объекта}$$

и в случае принятия второй гипотезы выделить область локализации Ω_s изображения КО (для простоты рассмотрим случай непрерывного изображения),

где:

$y(r)$ – неотрицательная функция анализируемого изображения,

$(r = (x, y), r \in \Omega)$ координаты текущей яркости на снимке,

$s(r)$ – функция изображения выделяемого объекта,

$N(r)$ – функция изображения реализации фоновой обстановки,

g_0 – постоянная составляющая изображения, обеспечивающая неотрицательность $y(r)$, $r \in \Omega_s$;

Ω_s – область локализации изображения опознаваемого объекта, входящая в область регистрации анализируемого изображения Ω ,

$(x_0, y_0) = \mathbf{r}_0$ – текущие координаты центра Ω_s на снимке.

Функция $N(r)$ задаётся выражением

$$N(r) = g(r)n(r) + \sum_{i=1}^M P_i u_i^* \delta(r - r_i),$$

где:

$n(r)$ – случайный шум, который принято считать стационарным нормальным белым шумом с нулевым средним и спектральной плотностью мощности N_0 ;

$g(r)$ – функция фона, которую принято считать либо детерминированной функцией, либо реализацией случайного неоднородного гауссова поля;

P_i - вероятность появления i -ой импульсной помехи;

u_i – интенсивность i -ой импульсной помехи, распределение которой можно считать равномерным с максимальным уровнем, сравнимым с уровнем интенсивности изображения наблюдаемого объекта;

r_i – неизвестное положение источника помехи в области локализации Ω - Ω_s ;

M – априори неизвестное количество импульсных помех;

$\delta(*)$ – функция Дирака.

Детализируем степень неопределённости получения малоконтрастных изображений:

- изображение является черно – белым, его интенсивность пикселей изменяется в диапазоне одного байта;
- закон распределения фонового излучения неизвестен;
- форма объекта – неизвестна;
- уровень отношения q (сигнал/шум) – неизвестен;
- радиус корреляции фонового излучения r меньше характерных размеров объекта d ($r < d$), однако, возможно наличие импульсных выбросов

высокого уровня интенсивности, сравнимого с уровнем интенсивности изображения наблюдаемого объекта;

- минимальное расстояние между импульсными помехами не менее определённого значения;
- изображение объекта сосредоточено в односвязной области, занимающей не более 10% площади полного кадра;
- процедура оцифровки оказывает влияние на качество изображения объекта.

При непосредственном синтезе алгоритма выделения изображения статистическими методами возникает ситуация, при которой вычислительная реализация полученного алгоритма затруднительна. Проведём разработку робастного алгоритма, в основу которого положено следующее базовое решение.

Алгоритм выделения известного изображения КО в присутствии аддитивного гауссова фона

Алгоритм оптимальной фильтрации локально-однородных априори известных изображений при наличии аддитивного пространственного гауссового фона с известной корреляционной функцией синтезирован в [3,4], где в модели описания фоновой обстановки отсутствует слагаемое, учитывающее наличие импульсных помех.

Известно [3], что ширина спектра функции $g(r)$ уже ширины спектров функций $s(r)$ и $n(r)$, а сам спектр функции $g(r)$ сосредоточен в области низких частот. Функции $g(r)$ и $s(r)$ обычно имеют различные первые моменты, т.е. разные средние яркости. Поэтому переход от одной функции к другой, т.е. от фона к объекту или от объекта к фону, как правило, сопровождается скачком яркости, расположенным в области границы фон/объект.

Структура алгоритма обработки непрерывного изображения в области пространственного спектра $w = (w_x, w_y)$ задается соотношением [1]

$$H(w) = CS^*(w) [N_0 |G(w)|^2]^{-1} \exp\{-i \langle w | r_0 \rangle\},$$

которое можно интерпретировать в виде двух последовательно соединённых фильтров. Первый осуществляет подавление фона в соответствии с передаточной функцией:

$$H_\phi(w) = C / |G(w)|^2,$$

где:

C – постоянный множитель.

Второй представляет собой согласованный с обнаруживаемым объектом фильтр с передаточной функцией:

$$H_s(w) = S^*(w) N_0^{-1} \exp\{-i \langle w | r_0 \rangle\},$$

где:

N_0 – спектральная плотность пространственно однородного фона.

В работах [1,2] показано, что поведение спектральной составляющей фона в области низких частот не является информативным, и его хорошей аппроксимацией является зависимость

$$|G(w)| = C < w | w >^{-2}.$$

С учетом вышесказанного соотношение для фильтра принимает вид

$$H(w) = M < w | w >^{-1} S^*(w) \exp \{-i < w | r_0 > \},$$

где M – некоторая константа.

После обратного преобразования Фурье получаем структуру пространственного фильтра в виде

$$\eta(r/r_0) = \nabla^2 s(r_0 - r),$$

где $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$ – оператор Лапласа.

Такая обработка изображений, которую принято называть пространственной согласованно-избирательной фильтрацией (ПСИФ), является квазиоптимальной. Применение оператора Лапласа приводит к оконтуриванию изображения и, следовательно, весовая функция $\eta(r/r_0)$ должна представлять собой контурное изображение обнаруживаемого объекта.

Робастный алгоритм выделения объекта

Модифицируем синтезированный алгоритм с учетом наличия в фоновой модели «ярких» импульсных помех и отсутствия информации о структуре наблюдаемого объекта.

В задаче выделения изображения объекта на малококонтрастном снимке детальное описание его геометрических и электродинамических характеристик является избыточным и является источником дополнительных помех. Поэтому предположим, что интенсивность изображения объекта в области его локализации Ω_S постоянна, положив $s(r) = \theta(r)$, где $\theta(*)$ – носитель Ω_S . Учитывая тот факт, что нам неизвестно положение центра изображения КО r_0 на снимке, для операции выделения контура $\eta(r) = \nabla^2 \theta(r - r_0)$ в Ω введем обозначение $K\{*/r_0\}$.

Если характеристики изображения КО и фона удовлетворяют $q \neq 1$, то операцией их разделения является пороговая обработка, параметром настройки которой является значение порога $l_{фон}$. Введём для неё обозначение $\Pi\{*/l_{фон}\}$. Результатом преобразования ОИ $K\{\Pi\{*/r_0\}\}$, при выбранном значении порога, является бинарный образ принятого изображения, в котором присутствуют импульсные яркостные отметки. Их устранение эффективно с помощью медианного фильтра, для которого введем обозначение $M\{*/l_m\}$, где l_m – длина (порядок) медианного фильтра.

Докажем коммутативность нелинейных операций пороговой обработки и формирования медианной оценки в произвольной области $\Omega_m(\rho_m)$ их проведения. Здесь ρ_m – условный центр области формирования медианной оценки. Восстановим плотность интенсивности исходного изображения $p(y/\rho_m)$ в $\Omega_m(\rho_m)$. Пусть моде этого распределения соответствует уровень интенсивности, равный y_m . После

проведения пороговой обработки при выбранном значении порога $l_{фон}$ соответствующая плотность интенсивности задаётся выражением

$$p_l(y/\rho_m) = \begin{cases} P_l * \delta(0) & \text{при } y < l \\ p(y/\rho_m) & \text{при } y \geq l \end{cases}$$

где $\delta(*)$ функция Дирака, $P_l = \int_0^l p(y/\rho_m) dy$.

Из приведённого соотношения вытекает следующее выражение для модуля Y_{ml} плотности распределения $p_l(y/\rho_m)$

$$Y_{ml} = \begin{cases} y_m & \text{при } y < l \\ 0 & \text{при } y \geq l \end{cases}$$

С учётом вышесказанного результат преобразования исходного изображения Y с использованием нелинейного алгоритма фильтрации можно представить в следующем виде:

$$Z = \mathcal{K} \left\{ M \left\{ Y \left[\frac{\cdot}{l_{фон}} \right], \right\} \right\},$$

структура которого робастна по отношению к вероятностному описанию фоновой обстановки и неизвестным характеристикам объекта.

Здесь Z – сформированное изображение при выбранных параметрах фильтров, которое при их правильной настройке должно содержать контур, ограничивающий область локализации изображения КО. В качестве параметров настройки алгоритма выступают l_m и $l_{фон}$.

Исходя из этого, можно сделать вывод, что выбор параметров алгоритма заключается в поиске оценок значений $l_{фон}$ и l_m . Эмпирическим путем выявлено, что

для получения качественного цифрового изображения существует ограничение $l_m \leq 7$. Таким образом, можно реализовать трёхканальную параллельную обработку исходного изображения при выбранных значениях $l_m = \{3, 5, 7\}$.

Рассмотрим структурную схему отдельного канала робастного алгоритма (рис. 1). Она включает в себя процедуры проведения единственной медианной фильтрации, формирования бинарного изображения при адаптивном выборе порога $l_{фон}$, выделения контура и обнаружения объекта. При этом единственным, подлежащим адаптивной оценке параметром является параметр $l_{фон}$.



Рис1. Структурная схема выделения изображения КО в кадре.

Выбор критерия принятия решения и характеристики качества решения задачи.

Ввиду отхода от строго статистического подхода в процессе синтеза алгоритма обработки, возникает проблема выбора критерия показателя качества формируемого решения и соответствующей характеристики. Как правило, при формировании изображения объекта выполняется условие $q > 1$, а гистограмма уровней интенсивности изображения – многомодальная функция. Функция

плотности распределения интенсивности фона $g(x, y)$ унимодальна и монотонно убывает с увеличением уровня интенсивности. Эвристическим показателем качества фильтрации присутствующего изображения объекта от фона может служить положение на гистограмме первого локального минимума при монотонном увеличении уровня интенсивности. С учётом априорной информации о локализации изображения объекта в односвязной области и структуре робастного алгоритма в качестве критерия принятия решения в отдельном канале выберем критерий первого минимума показателя сложности $\gamma^*(l_{фон})$, вычисляемого по формуле:

$$\gamma(l_{фон} / l_m) = (P(l_{фон} / l_m))^2 / S(l_{фон} / l_m),$$

где:

$$P(l_{фон} / l_m) = \int_{\Omega} (\theta(l_{фон} / l_m)) d\Omega \quad - \quad \text{периметр контура выделенного битового}$$

изображения $\theta(l_{фон} / l_m)$;

$$S(l_{фон} / l_m) = \int_{\Omega} \theta(l_{фон} / l_m) d\Omega \quad - \quad \text{его площадь.}$$

При обработке цифровых изображений на ЭВМ параметр оценка S вычисляется после формирования битового изображения при выбранном пороге и является совокупностью значимых пикселей в полученном изображении. Оценка длины контура l вычисляется аналогично после контурной обработки битового изображения.

Адаптивная оценка значения параметра $l_{фон}$ формируется по достижению первого локального минимума легко вычисляемого параметра $\gamma(l_{фон} / l_m)$. Пусть

сформированный на кадре битовый образ содержит k односвязных областей. Тогда, опустив обозначение $l_{фон} / l_m$, имеем

$$\gamma(k) = \left(\sum_{i=1}^k P_k \right)^2 / \sum_{i=1}^k S_k \geq \sum_{i=1}^k P_k^2 / \sum_{i=1}^k S_k,$$

где значение выражения в правой части неравенства можно рассматривать как грубую ожидаемую оценку параметра $\gamma(l_{фон} / l_m)$ соответствующей односвязной области. Из приведённого соотношения вытекает, что показатель сложности при одинаковом числе значимых пикселей в изображении принимает минимальное значение для плоских фигур простой формы. Например, для окружности его значение равно 4π , для квадрата – 16, в то время как для стержня $\approx 4x / d$, где x – длина стержня, $d = x$ – его диаметр.

Для локализации области выделяемого изображения в трёхканальной обработке введем функционал, заданный следующим соотношением $\gamma^*(l_{фон})$

$$\gamma^*(l_m^*, l_{фон}^*) = \min_{l_m} \min_{l_{фон}} \gamma^*(l_{фон} / l_m).$$

При найденном значении $\gamma^*(l_m^*, l_{фон}^*)$ в результате работы алгоритма из исходного изображения вырезается обнаруженная область предполагаемой локализации изображения объекта в форме квадрата, размер которого кратен степени 2. Выбор размера области, изображение которой может быть подвергнуто дальнейшей обработке с целью детализации его структуры, обусловлен параметрами практических вычислительных алгоритмов цифровой обработки различного назначения.

В качестве характеристики качества формируемого решения будем использовать характеристику выделения, которая является аналогом используемой в радиолокации характеристики обнаружения [3].

Примеры обработки изображений, полученных в натуральных условиях наблюдения.

Возможности обработки малоконтрастных снимков предложенным методом проиллюстрируем на примере обработки снимка космического аппарата (рис. 2), полученного в натуральных условиях наблюдения. На следующем рисунке приведены исходное изображение (вверху) и результаты его покаскадной обработки с учетом найденного размера области локализации изображения объекта.

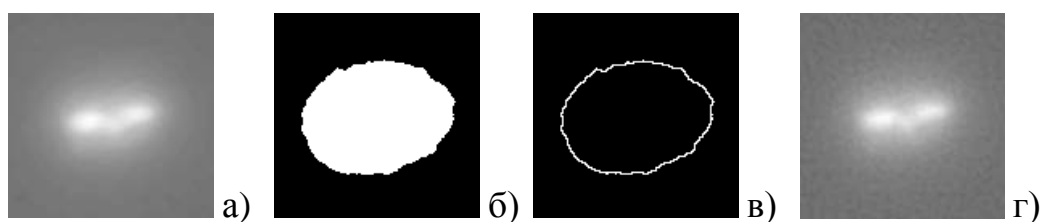


Рис. 2. Результаты восстановления области локализации изображения на снимке космического аппарата ИРС -1-7 (№ мжд 1997057001)

В нижнем ряду приведены изображения, последовательно получаемые после медианной фильтрации а) формирования битового образа б) и его контура в) с помощью предложенного критерия, а также г) преобразованный к максимальному динамическому диапазону вырезанный участок, содержащий область локализации изображения объекта. Визуальное восприятие полученных результатов позволяет сделать вывод о целесообразности разработки дополнительного алгоритма фильтрации, цель которого заключается в проведении детального анализа структуры сформированного изображения. Представленный результат отражает типичную ситуацию выделения области локализации изображения наблюдаемого удалённого объекта, при которой размеры выделенной области уменьшаются по крайней мере в 4 раза по сравнению размерами исходного снимка.

Пример визуальной демонстрации достижимого качества изображения по сравнению известными методами обработки приведён на рисунке (рис. 3).

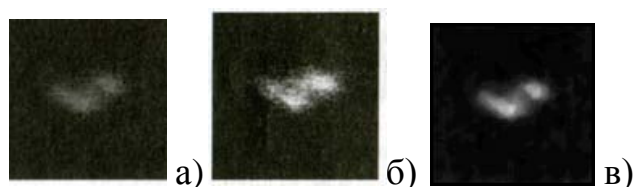


Рис. 3. Сравнительные результаты обработки изображения МКС

На рисунке слева направо представлены:

- а) – исходное изображение,
- б) – формируемое с помощью алгоритма устранения неравномерного фона (усреднения Лабейри)[5],
- в) – формируемое на выходе медианного фильтра в результате обработки предложенным методом.

Приведенная картина типична для процедуры сравнения. Визуальное восприятие изображений позволяет сделать вывод, что предложенный робастный

метод восстановления изображения на предварительном этапе не хуже известных. Достоинством метода является простота его реализации.

Заключение.

В работе синтезирован робастный алгоритм выделения изображения удаленного объекта неизвестной формы на малоконтрастном снимке, формируемом в системе атмосферного видения. Алгоритм устойчив к вероятностному описанию сложной фоновой обстановки. Предложен критерий принятия решения о наличии изображения на снимке, а также разработана структура параллельной трёхканальной обработки исходной информации.

Приведены примеры выделения изображения на снимках, полученных в натуральных условиях. Полученные результаты подтверждают эффективность предлагаемого метода обработки малоконтрастных снимков.

Библиографический список

1. Василенко Г.И., Тараторкин А.М. Восстановление изображений. – М.: Радио и связь, 1986. – 304 с.
2. Левшин В.Л. Пространственная фильтрация в оптических системах навигации. - М.: Сов. радио, 1971. – 200 с.
3. Фурман Я.А., Кревецкий А.В., Передреев А.К., Роженцов А.А., Хафизов Р.Г., Егошина И.Л., Леухин А.Н. Введение в контурный анализ; приложения к обработке изображений и сигналов / Под ред. Я.А. Фурмана. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 592 с.
4. Василенко Г.И. Голографическое распознавание образов. М.: Сов. радио, 1977. - 328 с.
5. Потапов А.А., Гуляев Ю.В., Никитов С.А., Пахомов А.А., Герман В.А. Новейшие методы обработки изображений / Под ред. А. А. Потапова. – М.: ФИЗМАЛИТ, 2008. – 496 с.