

ВЫДЕЛЕНИЕ ДВИЖУЩИХСЯ ОБЪЕКТОВ В СИСТЕМАХ ВИДЕОНАБЛЮДЕНИЯ ПРИ НАЛИЧИИ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ИСКАЖЕНИЙ ИЗОБРАЖЕНИЯ

Алпатов Б.А., Бабаян П.В.

Рязанская государственная радиотехническая академия

Автоматическое выделение движущихся объектов в последовательности видеоизображений – это одна из важнейших задач анализа изображений. В основе большого количества методов выделения движущихся объектов лежит принцип выявления изменений изображений во времени.

Важной проблемой для любого алгоритма выделения объектов является необходимость отличить изменения изображения, вызванные движением объектов, от изменений, вызванных помехами. В литературе [1] хорошо исследованы методы выделения объектов при наличии аддитивных шумов и при переменной освещённости. Иначе дело обстоит с геометрическими искажениями, наличие которых приводит к сильному снижению качества выделения.

Геометрические искажения наблюдаемых изображений можно разделить на две группы. К первой группе относятся искажения, связанные с движением датчика в пространстве. В простейших случаях эти искажения можно считать параметрическими: сдвиг, поворот, евклидовы, аффинные, проективные преобразования. Ко второй группе относятся случайные геометрические искажения, вызванные, прежде всего, преломлением световых лучей в атмосфере. Случайные преобразования чаще всего являются непараметрическими и слабо коррелированы в пространстве и во времени. Для параметрических искажений существует большое количество методов оценивания их параметров [2], однако в существующих работах по выделению движущихся объектов обычно не учитывается наличие случайных геометрических деформаций изображения.

В настоящей работе предлагается алгоритм выделения движущихся объектов, при синтезе которого учитывалось наличие случайных геометрических искажений. Синтезированный алгоритм похож на подход, предложенный [3] тем, что градиент изображения участвует в вычислении порога обнаружения.

Здесь и далее будем предполагать, что все изображения определены на непрерывном множестве координат $(x, y) \in R^2$. Пусть $g(x, y)$ это изображение наблюдаемой сцены в отсутствие искажений и движущихся объектов, далее будем называть его эталоном. Пусть $q(x, y)$ – изображение фона с присутствующими на нём объектами. Связь между $g(x, y)$ и $q(x, y)$ описывается моделью заслона:

$$q(x, y) = g(x, y)[1 - r(x, y)] + h(x, y)r(x, y), \quad (1)$$

где $r(x, y)$ – бинарное изображение, единичные значения которого задают расположения объектов, $h(x, y)$ – яркостное изображение всех движущихся объектов. Предположим, что в каждой точке (x, y) , удовлетворяющей выражению $r(x, y) = 1$, яркость объекта $h(x, y)$ является случайной величиной, распределённой по равномерному закону в диапазоне $[c_{\min}, c_{\max}]$, $h(x, y) \sim R(c_{\min}, c_{\max})$, где c_{\min}, c_{\max} – минимальная и максимальная яркости объекта.

Пусть $l(x, y)$ – наблюдаемое изображение. Связь между $q(x, y)$ и $l(x, y)$ задаётся выражением:

$$l(x, y) = q(M(\Psi(x, y))) + \xi(x, y), \quad (2)$$

где $\Psi(x, y) = (x - z_x(x, y), y - z_y(x, y))$ – преобразование координат, обусловленное случайными геометрическими искажениями, вызванными атмосферными явлениями, $Z(x, y) = (z_x(x, y), z_y(x, y))$ – векторное поле деформаций, связанных с преобразованием $\Psi(x, y)$. $M(x, y) = (\mu_x(x, y), \mu_y(x, y))$ – преобразование координат, обусловленное параметрическими искажениями, вызванными движением датчика, $\xi(x, y)$ – аддитивный шум датчика.

Предполагается, что $z_x(x, y), z_y(x, y)$ – гауссовы случайные величины, некоррелированные в пространстве: $z_x(x, y) \sim N(0, \sigma_z^2(x, y))$, $z_y(x, y) \sim N(0, \sigma_z^2(x, y))$. $\xi(x, y)$ – нормальный белый шум: $\xi(x, y) \sim N(0, \sigma_\xi^2(x, y))$, $\sigma_\xi^2(x, y) \ll c_{\max} - c_{\min}$.

В качестве $M(x, y)$ рассматривается преобразование сдвига на вектор (a, b) :

$$\mu_x(x, y) = x - a; \mu_y(x, y) = y - b. \quad (3)$$

Пусть каким-либо способом [2] получены оценки параметров (a, b) , которые мы обозначим соответственно (a^0, b^0) . Ошибки оценки параметров преобразований обозначим соответственно $\varepsilon_a, \varepsilon_b$:

$\varepsilon_a = a^0 - a$, $\varepsilon_b = b^0 - b$. Предположим, что $\varepsilon_a, \varepsilon_b$ независимы и распределены по нормальным законам: $\varepsilon_a \sim N(0, \sigma_a^2)$, $\varepsilon_b \sim N(0, \sigma_b^2)$, где σ_i^2 – дисперсия ошибки по смещению.

Таким образом, известны величины: $g(x, y)$, $l(x, y)$, $\sigma_z^2(x, y)$, $\sigma_\xi^2(x, y)$, (a^0, b^0) , σ_l^2 . Необходимо найти бинарное изображение $r^0(x, y)$, которое является оценкой для $r(x, y)$. Требования к алгоритму обнаружения задаются в форме Неймана-Пирсона, то есть

$$\begin{aligned} P(r^0(x, y) = 1 / r(x, y) = 0) &\leq p_-, \\ P(r^0(x, y) = 1 / r(x, y) = 1) &= p_+ \rightarrow \max, \end{aligned} \quad (4)$$

где p_- – заданное значение вероятности ложной тревоги, p_+ – вероятность правильного обнаружения, которая должна быть максимизирована путём оптимального выбора параметров алгоритма выделения объектов.

Чтобы решить предлагаемую задачу, сначала решим упрощённую задачу обнаружения.

Для упрощения изложения зафиксируем точку (x, y) , и все функции от (x, y) будем обозначать знаком самой функции, например, g вместо $g(x, y)$. Пусть в точке (x, y) известно эталонное изображение $g = g(x, y)$. Пусть тем или иным способом измерено значение величины $q = q(x, y)$. Обозначим это измеренное значение $u = u(x, y)$. Тогда $u = q + \theta$, где θ – ошибка измерения, имеющая плотность распределения $\rho_\theta(\alpha)$. Дисперсия ошибки θ мала по сравнению с шириной интервала $[c_{\min}, c_{\max}]$. Требуется найти $r^0 = r^0(x, y)$ в соответствии с критерием Неймана-Пирсона.

При $r = r(x, y) = 0$ справедливо соотношение $u = g + \theta$. При $r = r(x, y) = 1$ справедливо соотношение $u = h + \theta$. Плотность распределения случайной величины $h = h(x, y)$ обозначим $\rho_h(\alpha)$. Обозначим $\omega(u / r = n)$ плотность распределения величины u при $r = n$, тогда

$$\begin{aligned} \omega(u / r = 0) &= \rho_\theta(u - g), \\ \omega(u / r = 1) &= \rho_\theta(u) * \rho_h(u) \approx \rho_h(u), \end{aligned} \quad (5)$$

где символом $*$ обозначена свёртка функций.

Решение, оптимальное по критерию Неймана-Пирсона, имеет вид [4]:

$$r^0 = \begin{cases} 1, & \text{при } \lambda(u) > \lambda^0, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (6)$$

где $\lambda(u)$ – отношение правдоподобия:

$$\lambda(u) = \frac{\omega(u / r = 1)}{\omega(u / r = 0)} \approx \frac{\rho_h(u)}{\rho_\theta(u - g)}, \quad (7)$$

λ^0 – пороговое значение правдоподобия, которое определяется из уравнения

$$\int_{\lambda(u) > \lambda^0} \rho_\theta(u - g) du = p_-. \quad (8)$$

Таким образом, в соответствии с (6-8), для получения оптимальной оценки r^0 надо решить уравнение (8) относительно λ^0 , а затем сравнить отношение правдоподобия с порогом λ^0 . В частном случае, если плотность распределения величины ошибки θ гауссова, а плотность распределения яркости объекта равномерная, то область $\lambda(u) \leq \lambda^0$, на котором принимается решение об отсутствии объекта, является $(1 - p_-) \cdot 100\%$ доверительным интервалом для плотности распределения $\rho_\theta(u - g)$, то есть

$$r^0 = \begin{cases} 1, & \text{при } |u - g| > k(p_-) \sigma_\theta, \\ 0, & \text{в противном случае,} \end{cases} \quad (9)$$

где $k(p_-)$ – полуширина $(1 - p_-) \cdot 100\%$ доверительного интервала для нормированной гауссовой случайной величины.

Таким образом, зная яркость эталонного изображения $g(x, y)$ и дисперсию гауссовой ошибки $D[\theta(x, y)] = \sigma_\theta^2(x, y)$, производя измерения изображения $q(x, y)$, можно произвести оптимальное по критерию Неймана-Пирсона обнаружение объекта в точке (x, y) путём проверки попадания наблюдаемого

значения яркости $u(x, y)$ в $(1 - p_-) \cdot 100\%$ доверительный интервал яркости, центрированный на величине $g(x, y)$.

Будем считать, что нами получены достаточно точные оценки величин $g(x, y)$ и $\sigma_\xi^2(x, y)$. Эти оценки могут быть получены, например, методами, изложенными в [1]. Пусть $\Omega(x, y)$ – оценка преобразования $M(x, y)$, сформированная на основе оценок (a^0, b^0) :

$$\Omega(x, y) = (x - a^0, y - b^0). \quad (10)$$

В результате преобразования наблюдаемого изображения $l(x, y)$ в соответствии с преобразованием $\Omega^{-1}(x, y)$ получим измеренное изображение $u(x, y)$:

$$u(x, y) = l(\Omega^{-1}(x, y))$$

Очевидно, $l(x, y) = u(\Omega(x, y))$. $u(x, y)$ и $q(x, y)$ связаны соотношением:

$$u(x, y) = q(x, y) + \theta(x, y), \quad (11)$$

где $\theta(x, y)$ – ошибка измерения. Отметим, что ошибка $\theta(x, y)$ объединяет в себе как шум датчиков, так и искажения, вызванные случайными геометрическими деформациями изображения и неточностью оценки параметров сдвига. Найдём плотность распределения величины $\theta(x, y)$.

Из (2, 11) вытекает, что

$$\theta(x, y) = u(x, y) - u(x + a + z_x(x, y) - a^0, y + b + z_y(x, y) - b^0) + \xi_1(x, y) = u(x, y) - u(x - \varepsilon_a + z_x(x, y), y - \varepsilon_b + z_y(x, y)) + \xi_1(x, y),$$

где $\xi_1(x, y) = \xi(\Psi^{-1}(M^{-1}(x, y)))$, $\xi_1(x, y) \sim N(0, \sigma_\xi^2(x, y))$.

Раскладывая $u(x, y)$ в ряд Тейлора в окрестности точки (x, y) получим:

$$u(x, y) - u(x - \varepsilon_a + z_x(x, y), y - \varepsilon_b + z_y(x, y)) \approx \frac{\partial u(x, y)}{\partial x} (\varepsilon_a - z_x(x, y)) + \frac{\partial u(x, y)}{\partial y} (\varepsilon_b - z_y(x, y))$$

Тогда математическое ожидание величины $\theta(x, y)$ равно нулю, а её дисперсия

$$\sigma_\theta^2(x, y) \approx |\nabla u(x, y)|^2 (\sigma_a^2 + \sigma_b^2) + \sigma_\xi^2(x, y), \quad (12)$$

где $|\nabla u(x, y)|^2 = \left[\frac{\partial u(x, y)}{\partial x} \right]^2 + \left[\frac{\partial u(x, y)}{\partial y} \right]^2$ – квадрат модуля градиента изображения $u(x, y)$.

Таким образом, в присутствии случайных геометрических деформаций, назначение доверительного интервала обнаружения должно производиться с учётом градиента наблюдаемого изображения по формуле (12).

Экспериментальная проверка полученных выводов производилась с использованием естественной видеопоследовательности с отношением сигнал/шум около 7. В сюжете присутствовали геометрические искажения, вызванные турбулентностью атмосферы. Сюжет был снят подвижной видеокамерой. Движение датчика визуально проявлялось в виде равномерного дрейфа изображения со скоростью приблизительно 0,03 пикселя за кадр по горизонтали и 0,01 пикселя за кадр по вертикали. Выделение объектов производилось в соответствии с формулами (9), (12), которые были преобразованы к виду:

$$r^0(i, j) = \begin{cases} 1, & \text{при } |u(i, j) - g(i, j)| > T(i, j); \\ 0, & \text{в противном случае,} \end{cases} T(i, j) = k \sqrt{\sigma_\xi^2(i, j) + \gamma^2 |\nabla u(i, j)|^2} \quad (13)$$

где $T(i, j)$ – значение порога в точке (i, j) изображения, k – коэффициент доверительного интервала, γ – коэффициент учёта геометрических искажений.

Оценки фонового изображения $g(i, j)$ и дисперсии аддитивного шума $\sigma_\xi^2(i, j)$ вычислялись межкадровым методом [1]. Оценка модуля градиента изображения производилась по формуле

$$|\nabla u(i, j)| \approx \max \{ |u(i, j) - u(i + 1, j)|, |u(i, j) - u(i - 1, j)|, |u(i, j) - u(i, j + 1)|, |u(i, j) - u(i, j - 1)| \}$$

Исследование проводилось для различных значений параметра γ : 0; 0,1; 0,2; 0,5; 0,7. Заметим, что $\gamma = 0$ исключает из рассмотрения геометрические искажения изображения. Алгоритм выделения в этом случае совпадает с методом, предлагаемым в [1].

Анализ характеристик обнаружения показывает, что при увеличении параметра γ от 0 до 0,2 качество выделения объектов улучшается. Это проявляется в виде подъёма кривой характеристики обнаруже-

ния. При дальнейшем увеличении γ качество обнаружения ухудшается. При малых значениях вероятности ложной тревоги наблюдается более значительный рост качества обнаружения. На рисунке I приведены характеристики обнаружения при трёх значениях параметра γ : 0; 0,2; 0,7.

Таким образом, использование предлагаемого алгоритма позволило, с одной стороны, устранить часть ошибок, а, с другой стороны, полнее выделить объект.

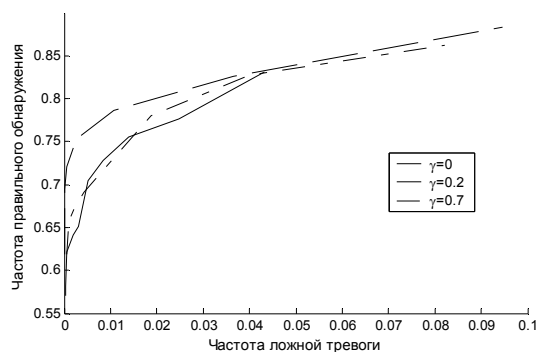


Рисунок I – Характеристики обнаружения при разных значениях γ

Аналогичные исследования, выполненные с использованием других естественных видеосюжетов, подтверждают эффективность предлагаемого алгоритма.

Литература

1. Алпатов Б.А., Бохан К.А. Алгоритм автоматического обнаружения, выделения и оценки динамических объектов, возникающих в последовательности телевизионных кадров // Цифровая обработка сигналов и её применение. Тез. докл. 3-й междунар. научн. конф. – М.: МЦНТИ, 2000. – С. 105-109.
2. Brown L. G. A survey of image registration techniques // ACM Computing Surveys, Vol. 24, No. 4. – Dec. 1992. – pp. 325-376.
3. Алпатов Б.А., Бабаян П.В. Обнаружение и слежение за движущимися объектами в присутствии дрожания и линейных сдвигов изображения // Цифровая обработка сигналов и ее применения. Тез. докл. 6-й междунар. конф. Том 2. – М.: 2004. – С. 95-96.
4. Акимов П.С. и др. Сигналы и их обработка в информационных системах. – М.: 1994.

