

## АНАЛИЗ И СИНТЕЗ СИГНАЛОВ И ИЗОБРАЖЕНИЙ

УДК 004.9

**В. С. Киричук, А. К. Шакенов**

(Новосибирск)

### ОБНАРУЖЕНИЕ ТОЧЕЧНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ, РЕГИСТРИРУЕМЫХ ДВИЖУЩЕЙСЯ КАМЕРОЙ

Рассматривается задача обнаружения точечных динамических объектов для новых условий регистрации последовательности изображений, отличающихся наличием в них проективных искажений стационарного фона. Приводятся алгоритмы обработки подобных последовательностей, а также результаты экспериментов по исследованию влияния входных воздействий и шума регистрации на вероятность обнаружения объекта.

**Введение.** Подходы к решению задачи обнаружения движущихся объектов по последовательности изображений разрабатываются уже на протяжении нескольких десятков лет. Ранее были предложены алгоритмы для обработки изображений, регистрируемых камерой, стационарной относительно подстилающей поверхности [1–3]. В настоящее время вызывает интерес обнаружение объектов по изображениям, полученным движущейся камерой. Перемещение регистрирующего датчика обуславливает не только движение фона, но и появление проективных искажений в этих изображениях, что делает ранее применяемые подходы неэффективными. В работе предложен алгоритм обнаружения динамических объектов по данным, полученным движущейся камерой.

**Постановка задачи.** Регистрирующая камера расположена на спутнике, который движется по круговой орбите на высоте  $h$ . В течение некоторого периода времени камера нацелена в одну точку на поверхности Земли. Регистрация ведется матричным приемником в ИК-диапазоне. По полученной последовательности изображений необходимо обнаружить движущийся объект или установить факт его отсутствия.

**Модель.** Исходя из условий съемки изображение (кадр)  $D^t(x, y)$ , зарегистрированное в момент времени  $t$ , можно представить аддитивными составляющими:

$$D^t(x, y) = M^t(x, y) + A_{\max} \Phi^t(x, y) + \Theta^t(x, y), \quad (1)$$

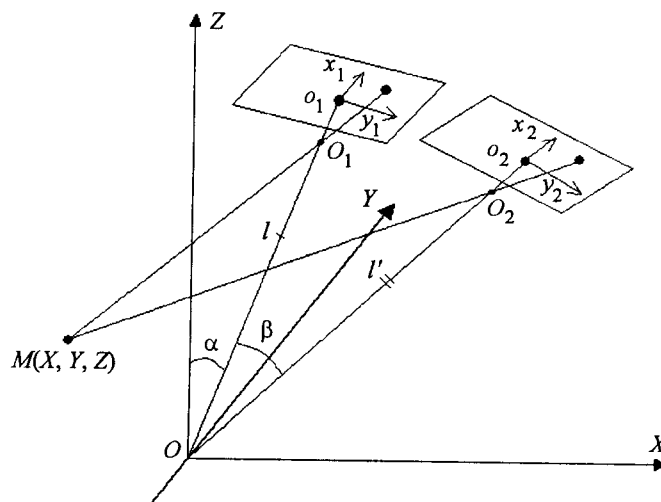


Рис. 1

где  $M'(x, y)$  – изображение стационарного фона;  $A_{\max}$  – максимальная амплитуда объекта;  $\Phi'(x, y)$  – форма объекта в момент времени  $t$ ,  $0 \leq \Phi'(x, y) \leq 1$  (в данной работе мы рассмотрим лишь случай, когда размер изображения объекта составляет 1 пиксел);  $\Theta'(x, y)$  – шум регистрации.

Регистрация изображений ведется в дискретные моменты времени  $t_0, t_1, \dots, t_N$ . В дальнейшем для краткости вместо индекса  $t_k$  будем использовать индекс  $k$ .

Яркость пиксел реальных изображений обозначим  $D^k(i, j)$ . В рассматриваемом алгоритме для получения яркости между узлами дискретной решетки использовалась билинейная интерполяция [4]. Значение яркости в нецелочисленной точке изображения  $(x, y)$ , полученное путем интерполяции, обозначим как  $D^k[x, y]$ .

Для обнаружения объекта в кадре  $D^k(x, y)$  необходимо исключить стационарный фон  $M'(x, y)$ . Построение алгоритма исключения стационарного фона во многом зависит от априорной информации о характере изменений условий съемки. Ниже приводятся результаты исследования изменений геометрии съемки для планируемого эксперимента.

**Величина смещения стационарного фона.** Рассмотрим произвольную точку  $M$  наблюдаемой поверхности (рис. 1). Оценим величину смещения проекции точки  $M$  на изображения при перемещении спутника на угол  $\beta$ . Для простоты вычислений предположим, что начало глобальной системы координат находится в точке нацеливания камеры, а также что координатная ось камеры  $x$  имеет то же направление, что и направление полета спутника, и совпадает с осью  $X$  глобальной системы координат. Кроме того, будем считать, что камера движется в плоскости  $XZ$ , т. е. наблюдение ведется в плоскости движения.

Проекция  $x_1$  точки  $M$  с координатами  $(X, Y, Z)$  имеет вид

$$x_1 = -f(X \cos \alpha - Z \sin \alpha) / (l - X \sin \alpha - Z \cos \alpha),$$

где  $f$  – фокусная длина камеры;  $\alpha$  – угол между нормалью к поверхности и оптической осью камеры;  $l$  – расстояние от камеры до проецируемой точки;  $X, Z \ll l$ . Проекция той же точки  $M$  после смещения камеры на угол  $\beta$  будет иметь вид

$$x_2 = -f(X \cos(\alpha + \beta) - Z \sin(\alpha + \beta)) / (l - X \sin(\alpha + \beta) - Z \cos(\alpha + \beta)). \quad (2)$$

В силу малости угла  $\beta$  можно положить  $l = l'$ . Обозначим  $\Delta x = x_1 - x_2$ , тогда

$$\Delta x = f \frac{X \{ \cos \alpha (l - X \sin(\alpha + \beta) - Z \cos(\alpha + \beta)) - \cos(\alpha + \beta)(l - X \sin \alpha - Z \cos \alpha) \}}{(l - X \sin \alpha - Z \cos \alpha)(l - X \sin(\alpha + \beta) - Z \cos(\alpha + \beta))}. \quad (3)$$

Учитывая, что изменение высоты рельефа много меньше размера наблюдаемой поверхности ( $Z \ll X$ ) и что при малом  $\beta$   $\sin(\beta) \approx \beta$ , получим приближенное равенство

$$\Delta x \approx l^{-2} f (X l (0,5 \beta^2 \cos^2 \alpha + \beta \sin \alpha) - X^2 \beta). \quad (4)$$

Введем следующие обозначения:

$$x_{\max} = f X_{\max} / l, \quad \delta = X_{\max} / l, \quad v = X / X_{\max}, \quad (5)$$

где  $X_{\max} = \max_X \{X / \exists Y_1, Z_1: (X, Y_1, Z_1) \in \text{наблюдаемой поверхности}\}$ .

В новых обозначениях перепишем (4) как

$$\Delta x \approx x_{\max} v (0,5 \beta^2 \cos \alpha + \beta \sin \alpha) - x_{\max} \delta \beta v^2. \quad (6)$$

Выясним, при каком темпе съема данных  $\Delta t$  величина смещения не превысит 1 дискрета ( $\Delta x \leq 1$ ). Запишем неравенство

$$x_{\max} v (0,5 \beta^2 \cos \alpha + \beta \sin \alpha) - x_{\max} \delta \beta v^2 \leq 1. \quad (7)$$

При  $\sin \alpha \neq 0$  членом главного порядка будет  $\beta \sin \alpha$ . Имеем

$$x_{\max} \beta \sin \alpha \leq 1. \quad (8)$$

Изменение центрального угла за время  $\Delta t$  составит

$$\Delta \gamma = 2\pi \Delta t / (90 \cdot 60) \approx \Delta t / 800. \quad (9)$$

При малом угле  $\beta$  справедливо следующее соотношение:

$$\beta \approx h^{-1}(R + h)\Delta\gamma. \quad (10)$$

Из (8)–(10) была получена оценка

$$\Delta t \leq 800(R + h)/(hx_{\max}), \quad (11)$$

где  $R$  – радиус Земли;  $h$  – высота спутника над Землей;  $x_{\max}$  – максимальная координата изображения по оси  $x$ . Необходимо учитывать, что эта оценка получена для ситуации, когда точка наблюдения лежит в плоскости орбиты. Если это условие не выполняется, то смещения возрастают за счет поворота камеры при отслеживании точки наблюдения.

**Методы межкадровой обработки.** Традиционно для исключения стационарного фона используют так называемые процедуры межкадровой обработки (МКО). Основная идея таких процедур заключается в использовании двух или более последовательных кадров для оценки и исключения стационарного фона. Например, в простейшем случае, когда изображение стационарного фона не изменяется со временем  $M^t(x, y) = M(x, y)$ , стационарный фон можно исключить, вычитая  $k$ -й кадр из  $k + 1$ -го:

$$\begin{aligned} R^k(x, y) &= D^{k+1}(x, y) - D^k(x, y) = M + A_{\max}\Phi^{k+1}(x, y) + \Theta^{k+1} - \\ &\quad - M - A_{\max}\Phi^k(x, y) - \Theta^k = \\ &= A_{\max}\Phi^{k+1}(x, y) - A_{\max}\Phi^k(x, y) + \Theta^{k+1} - \Theta^k. \end{aligned} \quad (12)$$

На практике различия фона  $M^k(x, y)$  и  $M^{k+1}(x, y)$ , вызванные изменениями условий съемки, можно компенсировать, построив функцию  $F^{k, k+1}: R^2 \rightarrow R^2$ , переводящую точки  $k$ -го кадра в точки  $k + 1$ -го. Теперь (12) запишем следующим образом:

$$R^k(i, j) = D^{k+1}[F^{k, k+1}(i, j)] - D^k(i, j). \quad (13)$$

При обработке последовательностей изображений, полученных камерой, неподвижной относительно подстилающей поверхности, хорошие результаты дает применение процедур МКО, работающих по паре последовательных кадров. Для данной задачи целесообразно применять алгоритмы, работающие по трем последовательным кадрам. С целью сравнения эффективности нами были рассмотрены алгоритмы, использующие два и три соседних кадра.

Алгоритмы, использующие два смежных кадра:

- 1) простая односторонняя разность;
- 2) оценивание аффинного преобразования процедурой LsqFitting [5];
- 3) оценивание смещения фрагментов по разложению в ряд Тейлора.

Алгоритмы, использующие три последовательных кадра:

- 1) двусторонняя полуразность;
- 2) полуразность с предварительным оцениванием смещения по методу разложения в ряд Тейлора;
- 3) алгоритм, основанный на весовой совместной подгонке трех кадров.

**Простая односторонняя разность.** Значение яркости в узлах промежуточного изображения получается путем вычитания значений яркости соответствующих узлов решетки предыдущего кадра из текущего. Результаты применения этого простого алгоритма иллюстрируют изменения, возникающие от кадра к кадру за счет субпиксельных смещений.

**Оценивание аффинного преобразования алгоритмом LsqFitting.** Пусть зарегистрированные изображения получены одной и той же перспективной камерой. Найдем функцию  $F^{k, k+1}(x, y)$  в виде аффинного преобразования

$$F(x, y) = \begin{cases} ax + by + c, \\ dx + ey + f. \end{cases} \quad (14)$$

Геометрические отличия хорошо описываются глобальным аффинным преобразованием только в случае плоской сцены. Наличие рельефа на наблюдаемой сцене приводит к ухудшению качества компенсации изменения геометрии съемки. Поэтому целесообразно разбить изображение на фрагменты и оценить для каждого фрагмента аффинное преобразование. В проведенных экспериментах использовался следующий алгоритм. Исходные изображения  $D^k(i, j)$  и  $D^{k+1}(i, j)$  разбивались на фрагменты  $32 \times 32$  пиксел. Затем для каждого фрагмента с помощью алгоритма LsqFitting оценивалось аффинное преобразование. Если для условий регистрации выполнено условие (11) и величина смещения фона не превосходит 1 дискрета, то в качестве начального приближения можно использовать тождественное положение фрагментов. Затем по формуле (13) строилась межкадровая разность.

**Оценивание смещения фрагментов по разложению в ряд Тейлора.** При малом смещении фона в небольшой окрестности некоторой точки аффинное преобразование (14) может быть аппроксимировано сдвигом

$$F(x, y) = \begin{cases} x + \Delta x, \\ y + \Delta y. \end{cases} \quad (15)$$

Величину сдвига можно оценить по методу разложения изображения в ряд Тейлора [1]. В экспериментах использовался следующий алгоритм. Исходные изображения  $D^k(i, j)$  и  $D^{k+1}(i, j)$  разбивались на фрагменты  $32 \times 32$  пиксел. Затем для каждого фрагмента по методу разложения в ряд Тейлора оценивался сдвиг (15), далее по формуле (13) строилась межкадровая разность.

**Алгоритмы, использующие три последовательных кадра.** Пусть в момент времени  $t_0$  проекция точки трехмерной сцены  $(X_0, Y_0, Z_0)$  в плоскость изображения имеет координаты  $(x^0, y^0)$ . Операторы проектирования  $x^0 = P_x^t(X_0, Y_0, Z_0)$ ,  $y^0 = P_y^t(X_0, Y_0, Z_0)$  зависят от параметров орбиты и

времени регистрации изображений; а при фиксированной орбите только от времени регистрации  $t$  или от угла наблюдения  $\alpha$ . Таким образом,

$$x^0 = P_x^\alpha(X_0, Y_0, Z_0), \quad y^0 = P_y^\alpha(X_0, Y_0, Z_0). \quad (16)$$

Обозначим координаты проекций  $(X_0, Y_0, Z_0)$  на соседние кадры  $D^{t_0 - \Delta t}(x, y)$ ,  $D^{t_0 + \Delta t}(x, y)$  как  $(x^-, y^-)$  и  $(x^+, y^+)$  соответственно. Тогда в момент времени  $t_0 - \Delta t$  (при угле наблюдения  $\alpha - \Delta\alpha_1$ ), где  $\Delta t$  – период съемки, имеем

$$x^- = P_x^{\alpha - \Delta\alpha_1}(X_0, Y_0, Z_0), \quad y^- = P_y^{\alpha - \Delta\alpha_1}(X_0, Y_0, Z_0). \quad (17)$$

Аналогично в момент времени  $t_0 + \Delta t$  (при угле наблюдения  $\alpha + \Delta\alpha_2$ ) имеем

$$x^+ = P_x^{\alpha + \Delta\alpha_2}(X_0, Y_0, Z_0), \quad y^+ = P_y^{\alpha + \Delta\alpha_2}(X_0, Y_0, Z_0). \quad (18)$$

Рассмотрим яркость последовательных изображений  $D^t(x, y)$  как функцию от угла наблюдения и трехмерных координат наблюдаемой сцены  $D^t(x, y) = D(\alpha(t), X, Y, Z)$ . Предполагая, что темп съема данных достаточно велик, т. е.  $\Delta\alpha_1 \ll 1$  и  $\Delta\alpha_2 \ll 1$ , разложим  $D(\alpha(t), X, Y, Z)$  в ряд Тейлора по параметру  $\alpha$  в окрестности точек  $(\alpha - \Delta\alpha_1, X_0, Y_0, Z_0)$  и  $(\alpha + \Delta\alpha_2, X_0, Y_0, Z_0)$ . Исключая значения производных, имеем

$$\begin{aligned} D(\alpha, X_0, Y_0, Z_0) = & (\Delta\alpha_2 + \Delta\alpha_1)^{-1} (\Delta\alpha_2 D(\alpha - \Delta\alpha_1, X_0, Y_0, Z_0) + \\ & + \Delta\alpha_1 D(\alpha + \Delta\alpha_2, X_0, Y_0, Z_0)) \end{aligned} \quad (19)$$

или, переписав (19) в ранее принятых обозначениях,

$$D^{t_0}(x^0, y^0) = \frac{\Delta\alpha_2 D^{t_0 - \Delta t}(x^-, y^-) + \Delta\alpha_1 D^{t_0 + \Delta t}(x^+, y^+)}{\Delta\alpha_1 + \Delta\alpha_2}. \quad (20)$$

Очевидно, что в общем случае изменение угла за равные промежутки времени будет разным:  $\Delta\alpha_1 \neq \Delta\alpha_2$ . Однако разность  $\Delta\alpha_1 - \Delta\alpha_2$  мала. Если положить  $\Delta\alpha_1 = \Delta\alpha_2$ , то получим

$$D^{t_0}(x^0, y^0) = \frac{D^{t_0 - \Delta t}(x^-, y^-) + D^{t_0 + \Delta t}(x^+, y^+)}{2}. \quad (21)$$

**Двусторонняя полуразность.** Этот алгоритм получается, если в формуле (21) не учитывать субпиксельные смещения и положить  $x^- = x^+ = x_j$ ,  $y^- = y^+ = y_j$ .

**Полуразность с предварительным оцениванием смещения по методу разложения в ряд Тейлора.** Возникает идея использовать формулу (21),

предварительно оценив  $(x^-, y^-)$  и  $(x^+, y^+)$ . Это можно сделать, например, с помощью описанной выше процедуры разложения в ряд Тейлора.

**Алгоритм, основанный на весовой совместной подгонке трех кадров.** Используем формулу (20) и аппроксимацию значений яркости между узлами дискретной решетки. Рассмотрим узел дискретной решетки  $(x_i, y_j)$  изображения  $D^{t_0}$ . Пусть  $(X_0, Y_0, Z_0)$  – точка трехмерной сцены, проектируемая в этот узел в момент времени  $t_0$ . Обозначим, как и раньше, проекции  $(X_0, Y_0, Z_0)$  на три последовательных изображения  $D^{t_0 - \Delta t}$ ,  $D^{t_0}$  и  $D^{t_0 + \Delta t}$  как  $(x^-, y^-)$ ,  $(x^0, y^0)$  и  $(x^+, y^+)$  соответственно. В данном случае  $(x^0, y^0) = (x_i, y_j)$ .

На рис. 2 крестом отмечены возможные положения  $(x^-, y^-)$ ,  $(x^0, y^0)$  и  $(x^+, y^+)$  соответственно. Предлагаемый алгоритм заключается в следующем. Пусть нам известно, в какую четверть попадают  $(x^-, y^-)$  и  $(x^+, y^+)$ , как это изображено на рисунке. Тогда значения  $D^{k-1}[x^-, y^-]$  и  $D^{k+1}[x^+, y^+]$  вычисляются как сумма яркостей в узлах (обозначены на рисунке кругами), умноженных на некоторые веса. Значения весов неявно определяют смещение проекций между узлами дискретной решетки. Затем согласно формуле (21)  $D^{k-1}[x^-, y^-]$  и  $D^{k+1}[x^+, y^+]$  суммируются с весами, сумма которых равна единице, и вычитаются из  $D^k(i, j)$ . Будем считать, что полученная разность равна нулю во всех узлах решетки в некотором прямоугольнике. Таким образом, получаем переопределенную систему линейных уравнений относительно десяти неизвестных. Решая ее с помощью МНК, находим неизвестные веса. Описанная система уравнений имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} & D^k(i, j) - (\lambda_1(\gamma_1 D^{k-1}(i+si, j+sj) + \gamma_2 D^{k-1}(i, j+sj) + \\ & + \gamma_3 D^{k-1}(i+si, j) + \gamma_4 D^{k-1}(i, j)) + \lambda_2(\gamma_5 D^{k+1}(i-si, j-sj) + \\ & + \gamma_6 D^{k+1}(i, j-sj) + \gamma_7 D^{k+1}(i-si, j) + \gamma_8 D^{k+1}(i, j))) = 0, \\ & i = N_1 + 1, \dots, N_1 + K - 1, \quad j = N_2 + 1, \dots, N_2 + K - 1, \end{aligned} \quad (22)$$

где  $\lambda_1 = \frac{\Delta\alpha_2}{\Delta\alpha_1 + \Delta\alpha_2}$ ;  $\lambda_2 = 1 - \lambda_1 = \frac{\Delta\alpha_1}{\Delta\alpha_1 + \Delta\alpha_2}$ ;  $\gamma_1, \dots, \gamma_8$  – неизвестные веса, определяющие положение  $(x^-, y^-)$  и  $(x^+, y^+)$  между дискретными узлами;  $si, sj = \pm 1$  определяют четверти, в которые смещаются  $(x^-, y^-)$  и  $(x^+, y^+)$  от

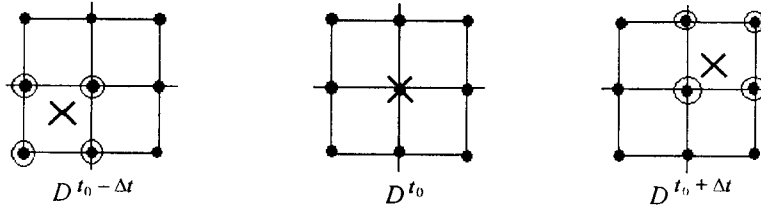


Рис. 2

носителем  $(x^0, y^0)$ ;  $(N_1, N_2)$  – начальное положение квадратного фрагмента изображения;  $K$  – размер фрагмента. Для увеличения быстродействия алгоритма целесообразно выбирать  $K$  кратным размеру изображения. Для ситуации, изображенной на рис. 2,  $si = -1$ ,  $sj = 1$  и уравнение принимает следующий вид:

$$\begin{aligned}
 & D^k(i, j) - (\lambda_1(\gamma_1 D^{k-1}(i-1, j+1) + \gamma_2 D^{k-1}(i, j+1) + \\
 & + \gamma_3 D^{k-1}(i-1, j) + \gamma_4 D^{k-1}(i, j)) + \lambda_2(\gamma_5 D^{k+1}(i+1, j-1) + \\
 & + \gamma_6 D^{k+1}(i, j-1) + \gamma_7 D^{k+1}(i+1, j) + \gamma_8 D^{k+1}(i, j))) = 0. \quad (23)
 \end{aligned}$$

Ранее предполагалось, что четверти, в которые попадают  $(x^-, y^-)$  и  $(x^+, y^+)$ , известны. Существует несколько способов определения искомой четверти. Один вариант – использование известной геометрии съемки. Плюсом этого варианта является быстрота, однако он имеет серьезный недостаток. На практике геометрия съемки и особенно углы поворота камеры известны с некоторой погрешностью, в результате могут возникнуть ошибки. В данной работе реализован другой вариант, не требующий добавочной информации. Обработка проводилась в два этапа. На первом этапе, используя разложение в ряд Тейлора, с грубой точностью определяли сдвиг для каждого прямоугольника. На втором этапе при известном сдвиге по  $x$  и  $y$  применялась описываемая процедура весовой подгонки.

**Сравнение эффективности алгоритмов межкадровой обработки.** Моделирование всех необходимых последовательностей изображений было выполнено с помощью программы 3D-графики Pov-Ray версии 3.1. Был смоделирован полет спутника на высоте 600 километров по круговой орбите. Регистрация изображений производилась камерой с углом зрения  $1^\circ$ . В течение времени регистрации камера отслеживала фиксированную точку на поверхности Земли. Угол отклонения зрительной оси от направления в надир составлял  $10^\circ$  по ходу движения спутника и  $5^\circ$  перпендикулярно движению. Темп съема данных при генерации исходной последовательности составлял 0,1 с. Из этой последовательности выбирались подпоследовательности для получения необходимого периода регистрации. Сгенерированные изображения содержали 256 уровней серого. Использовалась текстура со следующими статистическими характеристиками: минимальное и максимальное значения яркости 35 и 107 соответственно, средняя яркость 69,5, среднеквадратичное отклонение (СКО) яркости 17,5. На рис. 3 приведен первый кадр сгенерированной последовательности.

В табл. 1 сравнения процедур МКО для каждого алгоритма и темпа регистрации приводится среднеквадратичное отклонение яркости полученной межкадровой разности  $\xi_M = M^{k+1}[F^{k,k+1}(x, y)] - M^k(x, y)$ . Из таблицы видно, что алгоритм весовой подгонки по трем кадрам дает лучшие результаты и более устойчив к увеличению периода съема данных, поэтому были исследованы характеристики алгоритмов обнаружения объектов с использованием именно этой процедуры МКО.

**Зависимость качества подавления фона от статистических свойств текстуры.** Эффективность процедур МКО зависит от статистических



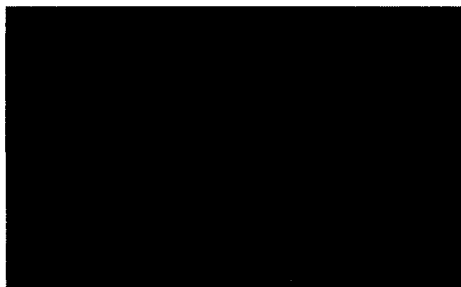


Рис. 3

свойств текстуры, в частности экспериментально была обнаружена сильная зависимость величины СКО межкадровой разности от интервала корреляции текстуры. Для исследования этой зависимости поставлен следующий эксперимент. При одной и той же геометрии съемки с использованием различных текстур генерировались последовательности изображений. Частота съема данных в этом эксперименте составляла 0,2 с. Обработываемые изображения не содержали шума регистрации. Использовалась следующая оценка автокорреляционной функции:

$$R(m, n) = (K_1 - N)^{-1} (K_2 - N)^{-1} \sum_{i=0}^{i < K_1 - N} \sum_{j=0}^{j < K_2 - N} (I(i, j) - \bar{I})(I(i + m, j + n) - \bar{I}), \quad (24)$$

где  $K_1, K_2$  – размеры изображения;  $N$  – размер квадратной области вычисления оценки;  $I(i, j)$  – исходное изображение;  $\bar{I}$  – оценка среднего значения

Т а б л и ц а 1

Алгоритм	Темп регистрации				
	$t = 0,1$ с	$t = 0,2$ с	$t = 0,3$ с	$t = 0,4$ с	$t = 0,5$ с
Разность двух кадров	0,261	0,368	0,450	0,525	0,6
LsqFitting	0,235	0,3	0,33	0,342	0,353
Смещение по ряду Тейлора	0,258	0,362	0,44	0,5	0,510
Полуразность по трем кадрам	0,185	0,256	0,3	0,315	0,327
Полуразность со смещением по ряду Тейлора	0,183	0,253	0,328	0,354	0,348
Весовая подгонка по трем кадрам	0,181	0,245	0,276	0,292	0,3

яркости исходного изображения. Интервалы корреляции по направлению  $x$ ,  $y$  и  $x = y$  оценивались соответственно как

$$R_x = R(0,0)^{-1} \sum_{i=0}^{i < N} |R(i,0)|, \quad (25)$$

$$R_y = R(0,0)^{-1} \sum_{i=0}^{i < N} |R(0,i)|, \quad (26)$$

$$R_{xy} = R(0,0)^{-1} \sum_{i=0}^{i < N} |R(i,i)|. \quad (27)$$

В табл. 2 приведены значения СКО межкадровой разности  $\xi_M$  для последовательностей с различным интервалом корреляции.

**Внутрикадровая обработка.** Внутрикадровая обработка – выделение отметок – проводилась следующим образом. Сначала выделялись локальные экстремумы межкадровой разности  $R^k(i, j)$ . Затем строилась гистограмма распределения яркости экстремумов. Согласно заданной вероятности ложной тревоги определялось количество отметок. По гистограмме выбирался порог яркости, соответствующий данному количеству отметок. Найденные экстремумы, яркости которых превосходили выбранный порог, помечались как подозрительные на наличие объекта. Поскольку в данной работе рассматривались точечные объекты, то фильтрация, согласованная с формой объекта, не проводилась.

**Эффективность обнаружения объекта в присутствии шумов регистрации.** Для исследования вероятности обнаружения объекта проведен эксперимент. Был смоделирован полет спутника с использованием такой же геометрии и текстуры, как в эксперименте по сравнению различных процедур МКО. Темп регистрации составлял 20 кадр/с. В сгенерированные идеальные изображения добавлялся гауссов шум со среднеквадратичным отклонением 5 дискрет. Было сгенерировано 12 исходных кадров, поэтому выход процедур межкадровой и внутрикадровой обработки содержал 10 кадров. Также был смоделирован полет 10 объектов с известными трехмерными координатами.

Таблица 2

$R_x$	$R_y$	$R_{xy}$	СКО $\xi_M$
7,397	9,725	6,170	0,184
4,784	5,840	4,057	0,336
3,693	4,070	3,014	0,360
2,608	3,210	2,285	0,389
2,482	2,661	1,932	0,430
2,051	2,377	1,772	0,482

Таблица 3

Отношение сигнал/шум	Вероятности ложной тревоги		
	$1,526 \cdot 10^{-4}$	$4,578 \cdot 10^{-4}$	$6,103 \cdot 10^{-4}$
	Усредненное количество обнаруженных объектов		
4,0	58,9	66,9	69,5
4,5	76,8	83,5	85,1
5,0	86,5	90,8	92,7
5,5	94,8	96,8	97,3
6,0	97,6	98,7	98,9

тами. Все объекты находились в поле зрения камер. Таким образом, на обработанной последовательности должно было быть обнаружено 100 объектов. Для каждого отношения сигнал/шум и уровня ложной тревоги эксперимент повторялся 100 раз. В табл. 3 приведено усредненное количество обнаруженных объектов для разных отношений сигнал/шум и различных вероятностей ложной тревоги. Значение СКО межкадровой разности составило примерно 5,438. Из таблицы видно, что при отношении сигнал/шум 5 и выше вероятность обнаружения объекта достаточно высока.

**Заключение.** Для новых условий формирования изображений, отличающихся наличием проективных искажений в стационарной части фона, разработан алгоритм обнаружения движущихся точечных объектов. Было проведено сравнение следующих алгоритмов: вычитание фона в двух соседних кадрах, оценивание геометрических искажений в виде аффинного преобразования по алгоритму LsqFitting, оценивание геометрических искажений в виде сдвига с помощью разложения яркости в ряд Тейлора, полуразность по трем последовательным кадрам, оценивание сдвига по трем кадрам и двухитерационная весовая подгонка по трем кадрам. Экспериментально было установлено, что простое вычитание двух соседних кадров дает результаты, не достаточные для обнаружения слабоконтрастных объектов. Алгоритмы, оценивающие геометрические искажения по двум кадрам, значительно уступают алгоритмам, обрабатывающим три кадра одновременно. Двухитерационная весовая подгонка показала лучшие результаты и устойчивость к величине искажений. Исследована зависимость качества подавления фона от интервала корреляции текстуры. Также было установлено, что при уменьшении интервала корреляции текстуры предлагаемый алгоритм обнаружения сохраняет работоспособность даже для текстур, близких к белому шуму. Приведены экспериментально оцененные вероятности обнаружения объектов при различном уровне шума регистрации. Проведенные исследования показали, что предлагаемый алгоритм имеет высокую вероятность обнаружения при малых отношениях сигнал/шум.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Губанов А. В., Ефимов В. М., Киричук В. С. и др. Методы оценивания взаимного смещения фрагментов цифровых изображений // Автометрия. 1988. № 3. С. 70.
2. Киричук В. С., Пустовских А. И. Применение статистических методов в задаче оценивания стационарной части фона по серии изображений // Там же. С. 74.
3. Киричук В. С., Яковенко Н. С. Структурные алгоритмы анализа последовательности изображений // Автометрия. 1995. № 6. С. 3.
4. Сойфер В. А. Методы компьютерной обработки изображений. М.: Физматлит, 2001.
5. Попов S. A. Direct solution of the least squares matching problem // Proc. of ISAS/SCI-2001. Orlando, Fl., USA. 2001. XIII, Pt. II. P. 49.

*Институт автоматизации и электрометрии СО РАН,  
E-mail: adil.shakenov@ngs.ru*

*Поступила в редакцию  
30 сентября 2003 г.*

---

**Подписка на наш журнал – залог Вашего успеха!**