

УДК 681.327

И.Л. Захаров

**АЛГОРИТМ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ,  
ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫХ МАТРИЧНЫМИ ФОТОПРИЕМНИКАМИ**

*Описывается алгоритм восстановления изображений при их регистрации оптико-электронной системой на основе матричного фотоприемника. Данный алгоритм реализуется на базе линейного метода ортогонализации оптимального по минимуму среднеквадратической ошибки восстановления изображения для двух задач: восстановления в реальном времени и восстановления мелких фрагментов изображений с целью их цифрового увеличения. Разработанный алгоритм апробирован на изображениях, полученных при дистанционном наблюдении в условиях ночного видения и спутникового зондирования.*

**Введение**

За последние два десятилетия наблюдается развитие оптико-электронных систем на основе матричных фотоприемников (МФ). Данные системы используются для дистанционного наблюдения, решения различных практических задач на производстве, при разработке современных приборов для медицины, приборов неразрушающего контроля и др. Основные типы МФ – это фотодиодная матрица и прибор с зарядовой связью. В настоящее время наметилась тенденция к интеграции МФ с блоком обработки изображений в виде одной или нескольких микросхем. В свою очередь, регистрация изображения матричным фотоприемником имеет ряд особенностей, связанных с геометрическими параметрами светочувствительных элементов МФ и шумом, что влияет на качество изображения [1, 2].

Под восстановлением понимается задача реконструкции изображения, которое было искажено в процессе регистрации, при этом используется априорная информация о явлении, вызвавшем ухудшение изображения [3]. Решение задачи восстановления изображений, зарегистрированных МФ, строится на моделировании процессов искажения и применения обратных процедур для восстановления исходного изображения, при этом актуальной является задача оценки влияния параметров МФ на качество регистрируемых изображений.

С ростом производительности вычислительной техники появилась возможность уменьшить время обработки данных и увеличить точность используемых систем. Оптимизация алгоритмов восстановления как по одному, так и по нескольким изображениям, регистрируемым МФ, необходима для реализации быстрого алгоритма восстановления размытых, зашумленных и дискретизированных изображений. Важной также является задача цифрового увеличения разрешения изображений для выделения мелких деталей. Оптимальное восстановление изображений, зарегистрированных системой на основе МФ, является актуальной проблемой для разработки таких систем.

**1. Восстановление изображения, зарегистрированного матричным фотоприемником**

Рассмотрим процесс формирования изображения оптико-электронной системой на основе МФ. Информация об оптических характеристиках сцены  $z(\xi, \lambda)$  переносится оптической системой, характеризуемой функцией размытия точки (ФРТ). Оптическая система формирует монохроматическое изображение  $f(\mathbf{x}, \lambda)$  на МФ по линейному закону, который можно записать с учетом длины волны излучения  $\lambda$  как

$$\int_{-S_1}^{S_1} \int_{-S_2}^{S_2} z(\xi, \eta, \lambda) K(\mathbf{x}, \xi, \eta, \lambda) d\xi d\eta = f(\mathbf{x}, \lambda), \quad (1)$$

где  $K(\mathbf{x}, \xi, \eta, \lambda)$  – ядро данного интегрального преобразования, которое является ФРТ; интегрирование проводится по области  $[-S_1, \dots, S_1; -S_2, \dots, -S_2]$ . Изображение  $f(\mathbf{x}, \lambda)$  МФ преобразуется в электрические сигналы  $F_{i,j}$  по правилу

$$F_{i,j} = \iint_{A_{i,j}} Sen(\mathbf{x}, \lambda) f(\mathbf{x}, \lambda) d\mathbf{x} + \gamma_{i,j}, \quad (2)$$

где  $A_{i,j}$  – площадь светочувствительного элемента МФ (пикселя) с номером  $(i, j)$ ,  $Sen(\mathbf{x}, \lambda)$  – спектральная функция чувствительности;  $\gamma_{i,j}(\lambda)$  – погрешность электрического сигнала  $F_{i,j}(\lambda)$ ,  $i = 1, 2, \dots, I$ ,  $j = 1, 2, \dots, J$ . Объединяя выражения (1) и (2), получим

$$\int_{-S_1}^{S_1} \int_{-S_2}^{S_2} z(\xi, \eta, \lambda) K_1(i, j, \xi, \eta, \lambda) d\xi d\eta = f_{i,j}(\lambda) + \gamma_{i,j}(\lambda) = F_{i,j}(\lambda), \quad (3)$$

где  $f_{i,j}(\lambda)$  – точное значение электрического сигнала, считанного с пикселя под номером  $(i, j)$ ;

$$K_1(i, j, \xi, \eta, \lambda) = \iint_{A_{i,j}} Sen(\mathbf{x}, \lambda) K(\mathbf{x}, \lambda) d\mathbf{x}. \quad (4)$$

Электрические сигналы  $F_{i,j}(\lambda)$  поступают в ПЭВМ (блок обработки сигналов), которая использует их значения для восстановления непрерывного варианта  $z(\xi, \eta, \lambda, \mathbf{\beta})$  искомого изображения  $z(\xi, \eta, \lambda)$ . Для реализации этой процедуры требуется учесть выражения (1), (2) и стабилизирующий векторный параметр, делающий решение (5) устойчивым и обозначенный здесь символом  $\mathbf{\beta} = (\beta_1, \beta_2, \dots)$ ,  $\beta_k > 0, k = 1, 2, \dots$ . Значения  $\beta_k$  определяются отношением «сигнал – шум» и коэффициентами разложения искомого изображения по базисным функциям [4], выражение для их расчета приведено ниже. Фильтр обработки изображений, зарегистрированных МФ, можно рассчитать на основе выражения

$$Q(\xi, \eta, i, j, \mathbf{\beta}) = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\sum_{k=1}^m d_{km}(\mathbf{\beta}) \varphi_k(i, j) \sum_{k=1}^m d_{km}(\mathbf{\beta}) \psi_k(\xi, \eta)}{\beta_m + \sum_{k=1}^m d_{km}(\mathbf{\beta}) (\varphi_k, \varphi_m)}, \quad (5)$$

где  $\psi_k(\xi, \eta)$  – базисные функции Карунена – Лозва для разложения искомого изображения  $z(\xi, \eta)$ ;  $(\varphi_k, \varphi_m) = \sum_i \sum_j \varphi_k(i, j) \varphi_m(i, j)$  – скалярные произведения в унитарном векторном пространстве. Коэффициенты  $d_m(\bar{\beta})$  рассчитываются по рекуррентной формуле

$$\left\{ \begin{array}{l} d_{ln}(\mathbf{\beta}) = - \sum_{m=l}^{n-1} d_{lm}(\mathbf{\beta}) \frac{\sum_{k=1}^m d_{km}(\mathbf{\beta}) (\varphi_k, \varphi_m)}{\beta_m + \sum_{k=1}^m d_{km}(\mathbf{\beta}) (\varphi_k, \varphi_m)}, \\ l = 1, 2, \dots, n-1; n = 2, 3, \dots; \\ d_{kk}(\mathbf{\beta}) = 1, k = 1, 2, \dots \end{array} \right. \quad (6)$$

Отметим, что базисные функций разложения Карунена – Лозва в данном случае являются комплексными. В качестве априорной информации в моделях изображения и шума, как и в ме-

тоде Винера, полагаем, что случайные функции  $z(\xi, \eta)$  и  $\gamma(x_i, y_j)$  характеризуются статистической информацией – автокорреляционными функциями второго порядка  $R_{zz}$  и  $R_{\gamma\gamma}$  [5].

Рассчитанные значения восстановленного изображения  $z(\xi, \eta, \lambda, \beta)$  подаются на устройство вывода (рис. 1).

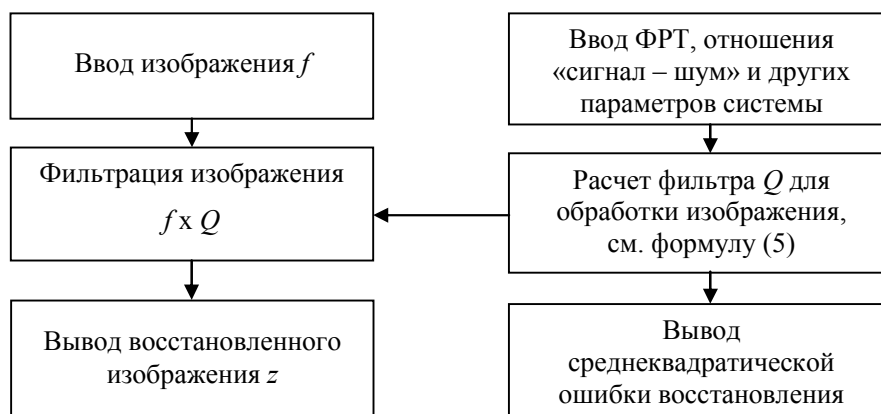


Рис. 1. Структурная схема восстановления изображений

Светочувствительная площадка элемента МФ (пиксель) не всегда является прямоугольной и может иметь достаточно сложную геометрическую форму [2]. Этот факт влияет на результат регистрации [6] и должен, по возможности, учитываться при разработке алгоритмов восстановления изображений. Функция светочувствительности пикселя МФ  $Sen(x, \lambda)$  зависит также от спектра излучения и для некоторых типов МФ влияет на точность регистрации мелких изображений с размерами, сопоставимыми с размером пикселя, например, в астрономии [1].

При реализации алгоритма восстановления изображений, зарегистрированных МФ, функцию светочувствительности (в виде числового массива) необходимо использовать как один из параметров. Для недорогой веб-камеры функция светочувствительности пикселя для белого цвета, не зависящая от длины волны и найденная экспериментально, показана на рис. 2. Например, если полагать функцию светочувствительности  $Sen(x, \lambda)$  в выражении (4) постоянной и не зависящей от координат, то применение алгоритма восстановления, который требует регистрации с субпиксельной точностью, может привести к ошибочным результатам. Особенно важным является учет данной функции при одновременной обработке нескольких изображений, отличающихся субпиксельным сдвигом, так как в этом случае накапливается величина возможной ошибки.

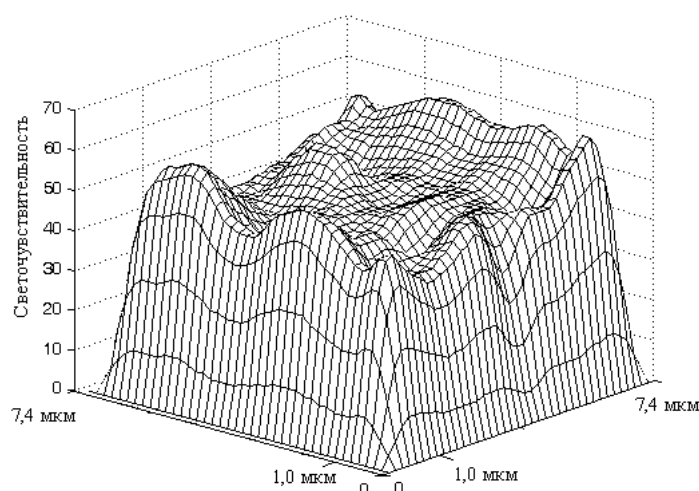


Рис. 2. Функция светочувствительности одного пикселя веб-камеры для белого цвета

## 2. Теоретическая оценка качества результата восстановления

Коэффициенты разложения  $c_l$  искомым реализаций

$$z(\xi, \eta) = \sum_{k=1}^{\infty} c_k \psi_k(\xi, \eta) \quad (7)$$

случайного изображения некоррелированы, т. е. выполняются условия  $\langle c_l c_k \rangle = \langle c_k^2 \rangle \delta_{lk}$ , где

$$\langle c_l c_k \rangle = \int_{-S_1}^{S_1} \int_{-S_2}^{S_2} R_{zz}(\xi, \eta, \xi', \eta') \psi_l(\xi, \eta) \psi_k(\xi', \eta') d\xi d\eta d\xi' d\eta'.$$

Здесь и далее угловые скобки означают усреднение по множеству реализаций, а на практике в качестве модели шума используют модель некоррелированного шума [7]:  $\langle \gamma(i, j) \gamma(k, l) \rangle = \gamma^2 \delta_{jk} \delta_{il}$ .

Полагая изображение и шум некоррелированными, среднеквадратическая ошибка может быть найдена из выражения

$$\rho^2(\mathbf{\beta}) = \left\langle \int_{-S_1}^{S_1} \int_{-S_2}^{S_2} |z(\xi, \eta, \mathbf{\beta}) - z(\xi, \eta)|^2 d\xi d\eta \right\rangle, \quad (8)$$

которое имеет минимум при  $\beta_m = \beta_m^* = \gamma^2 / \langle c_m^2 \rangle$ , где дискретная пространственная частота  $m = 1, 2, \dots$ , причем выражение

$$\rho^2(\mathbf{\beta}^*) = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\langle c_m^2 \rangle \gamma^2 \sum_{l=1}^m d_{lm}^2(\mathbf{\beta}^*)}{\gamma^2 + \langle c_m^2 \rangle \sum_{k=1}^m d_{km}(\mathbf{\beta}^*) (\varphi_k, \varphi_m)} \quad (9)$$

является значением этого минимума.

Базисные функции  $\psi_l(\xi, \eta)$  являются собственными функциями уравнения, если положить  $d_m(\mathbf{\beta}) = 0$  при  $l \neq m$  и решение (5) совпадает с методом Винера [8], обобщенным на дискретный спектр собственных функций  $\lambda_k : |\lambda_k|^2 = (\varphi_k, \varphi_k)$ .

Первая попытка оценки качества оптической системы с позиций теории информации была предпринята в работе [9], в которой была предложена функция информационной оценки изопланатических оптических систем (систем, у которых ФРТ не зависит от сдвига координат), названная пропускной способностью системы или количеством информации в изображении. Данная функция может быть использована для оценки качества оптической системы с учетом возможностей восстановления зарегистрированных изображений.

Зависимость ФРТ системы на основе МФ от сдвига координат не позволяет напрямую корректно применить данную теоретическую оценку для задачи анализа качества изображения, регистрируемого МФ. В настоящей работе использована оценка качества систем более общего класса – линейных [10]. Качество изображения, регистрируемого оптико-электронной системой на основе МФ, определяется максимально возможной точностью восстановления изображения по электрическим сигналам МФ  $F_{i,j}$ . Отметим, что задача определения непрерывного изображения по конечному числу не точно известных дискретных значений правой части уравнения (1) некорректно поставлена [4, 10], она может иметь множество сколь угодно различных решений. Поэтому для контроля точности ее решений любым методом необходима дополнительная информация. В настоящей работе используется априорная информация о взаимной корреляции шума и изображения. Применение теории вероятностей позволяет рассчитывать вероятностные характеристики ошибок восстановления. Неравенство Чебышева [5], позво-

ляющее оценить верхнюю границу  $P$  (вероятность того, что отклонение случайной величины от ее центра расположения превысит заранее заданное значение  $\langle \|z\|_{L_2}^2 \rangle$ ), имеет вид

$$P \left\{ \int_{-s}^s [z(\xi) - z(\xi, \beta)]^2 d\xi \geq \langle \|z\|_{L_2}^2 \rangle \right\} \leq \frac{\rho^2}{\langle \|z\|_{L_2}^2 \rangle},$$

где норма  $\langle \|z\|_{L_2}^2 \rangle = \sum_{k=1}^{\infty} \langle c_k^2 \rangle$ .

Изображение  $z(\xi, \lambda)$  и погрешности  $\gamma_{i,j}$  полагаются случайными с априорно заданными статистическими характеристиками величинами. При этом случайные изображение и погрешности характеризуются плотностями распределения вероятностей, а методы теории вероятностей позволяют рассчитывать плотность распределения вероятностей ошибки восстановления изображения любым регуляризованным (в том числе и нелинейным) методом. Тогда можно поставить следующую задачу: на множестве регуляризованных методов найти такой, для которого вероятность того, что ошибка превзойдет заданную величину при восстановлении случайного изображения, была бы минимальна. Пусть для каждой пространственной частоты  $\omega$  спектра Фурье восстановленного изображения задана минимальная точность  $a(\omega)$ . Тогда можно определить событие  $A(\omega, \beta)$  как  $\{|z(\omega, \beta) - z(\omega)| < a(\omega)\}$ . Это событие означает, что точность восстановления реализации изображения некоторым регуляризованным методом (характеризуемым стабилизирующим оператором  $\beta$ ) на данной пространственной частоте  $\omega$  удовлетворительна для пользователя. Таким образом, собственное количество информации в дополнительном событии  $\bar{A}(\omega, \beta)$  определяется как  $\{|z(\omega, \beta) - z(\omega)| \geq a(\omega)\}$  и зависит от метода восстановления, помеченного здесь символом  $\beta$ , статистической априорной информации о случайных шуме  $\gamma_{ij}$  и искомом изображении  $z(\xi, \lambda)$ , требуемой пользователем точности  $a(\omega)$ , а также от функции  $K_1$ , определяемой выражением (4). Количество информации вычисляется по формуле

$$I(\omega, \beta) = -\ln P[\bar{A}(\omega, \beta)], \quad (10)$$

где  $P[\bar{A}]$  – вероятность события  $\bar{A}$ . Очевидно, что выражение (10) является естественной характеристикой качества оптико-электронной системы на основе МФ при применении произвольного метода восстановления, характеризуемого параметром  $\beta$ .

Максимум берется по заданному множеству всех регуляризованных методов восстановления  $\beta$ . Обычно при реализации алгоритмов, позволяющих производить обработку в реальном времени (300 000 пикселей за 10 мс), множество методов восстановления задается в параметрическом виде. Приближенное решение уравнения (1) представляется в виде, зависящем от одного или нескольких параметров  $\beta$ , значения которых выбираются с использованием дополнительной статистической информации о случайных изображениях и шуме так, чтобы по возможности минимизировать величину  $P[\bar{A}(\omega, \beta)]$ . Таким образом, значения параметров выбираются так, чтобы удовлетворительные для пользователя результаты получались как можно чаще. Наиболее просто значения  $P[\bar{A}(\omega, \beta^*)]$  и оптимальный оператор  $\beta^*$  определяются, если предположить, что коэффициенты разложения случайного изображения по системе собственных функций уравнения статистически независимы. Тогда оператор  $\beta$  представляется набором монотонных функций [11].

### 3. Быстрое восстановление изображений

Быстрый алгоритм восстановления изображений необходим для реализации в реальном режиме времени [12], например, телевизионных изображений и других видеопоследовательно-

стей с количеством пикселей порядка 300 000. Быстродействие алгоритма достигается за счет двух основных приемов:

- вычисления фильтра только для одной точки (в центре изображения) и далее восстановления всего изображения по принципу скользящего окна;
- декомпозиции фильтра из двумерного на произведение одномерных в силу возможности разложения Гауссовой функции, описывающей ФРТ.

Выражение, описывающее формирование изображений для дискретных значений, имеет вид

$$\int_{-S_1-S_2}^{S_1} \int_{-S_2}^{S_2} z(\xi, \eta) K(x_i - \xi, y_j - \eta) d\xi d\eta = f(x_i, y_j) + \gamma(x_i, y_j) = F(i, j), \quad (11)$$

где  $z(\xi, \eta)$  – искомое изображение (объект);  $K(x_i - \xi, y_j - \eta)$  – ФРТ с координатами  $(\xi, \eta)$ , т. е. изображение функции  $\delta(\xi, \eta)$ ;  $f(x_i, y_j)$  – незашумленное изображение;  $F(i, j)$  – зарегистрированное изображение;  $\gamma(x_i, y_j)$  – погрешность регистрации в точках плоскости изображений  $(i, j)$ .

Быстрый алгоритм восстановления строится на базе фильтра  $Q$  локальной обработки в скользящем окне на основе выражения

$$z(\xi, \eta, \mathbf{\beta}) = \sum_i^I \sum_j^J F(i, j) Q(\xi, \eta, i, j, \mathbf{\beta}), \quad (12)$$

где фильтр  $Q(\xi, \eta, i, j, \mathbf{\beta})$  определяется выражением (5);  $I, J$  – количество элементов МФ по координатам  $x$  и  $y$  соответственно.

Для построения быстрого алгоритма восстановления размытого изображения в выражении  $z$  следует использовать разделимое по координатам  $x$  и  $y$  ядро  $Q$  [13], при этом сначала рассчитывается значение восстанавливаемого изображения в точке  $(i, j)$  с учетом соседних пикселей вдоль оси  $X$ :

$$z_{\perp}(i, j, \mathbf{\beta}) = \sum_{k=-M+i}^{M+i} F(k, j) Q(k - i, \mathbf{\beta}), \quad (13)$$

где  $2M + 1$  – размер окна по горизонтали.

Затем подобным образом рассчитывается значение вдоль вертикальной оси согласно выражению

$$z(i, j, \mathbf{\beta}) = \sum_{l=-L+j}^{L+j} z_{\perp}(i, l, \mathbf{\beta}) Q(l - j, \mathbf{\beta}), \quad (14)$$

где  $2L + 1$  – размер окна по вертикали.

Опишем алгоритм быстрого восстановления по шагам.

*Шаг 1.* Рассчитаем фильтр  $Q$  по формуле (5) с использованием выражения (6) только в одной точке  $(\xi, \eta) = 0$ . Размер скользящего окна составляет  $(2M + 1) \times (2L + 1)$ . Если ФРТ описывается Гауссовым распределением, разложение фильтра в виде произведения строки и столбца возможно всегда. Если ФРТ представляет функцию, не разлагаемую по координатам (например, для оптически неоднородных сред), то для разложения фильтра можно использовать сингулярное разложение [13] либо аппроксимацию фильтра разложимой функцией.

*Шаг 2.* Проводим вычисления восстановленного изображения скользящим окном по горизонтали согласно выражению (13).

*Шаг 3.* Используя вычисленные значения  $z_{\perp}$ , рассчитываем значение точек восстановленного изображения по вертикали согласно выражению (14).

Рассмотрим пример использования быстрого алгоритма на основе метода ортогонализации в сравнении с методами Винера при тех же параметрах и медианной фильтрации (рис. 3). Параметры

реализации алгоритма для данного примера: размер изображения –  $640 \times 480$ , размер скользящего окна –  $17 \times 17$ , количество функций разложения изображения (7) – 200, время расчета – 0,01 с на персональном компьютере с процессором с частотой 750 МГц. Метод Винера имеет ограничения для системы на основе МФ, что не позволяет сделать количественное сравнение результатов [8].

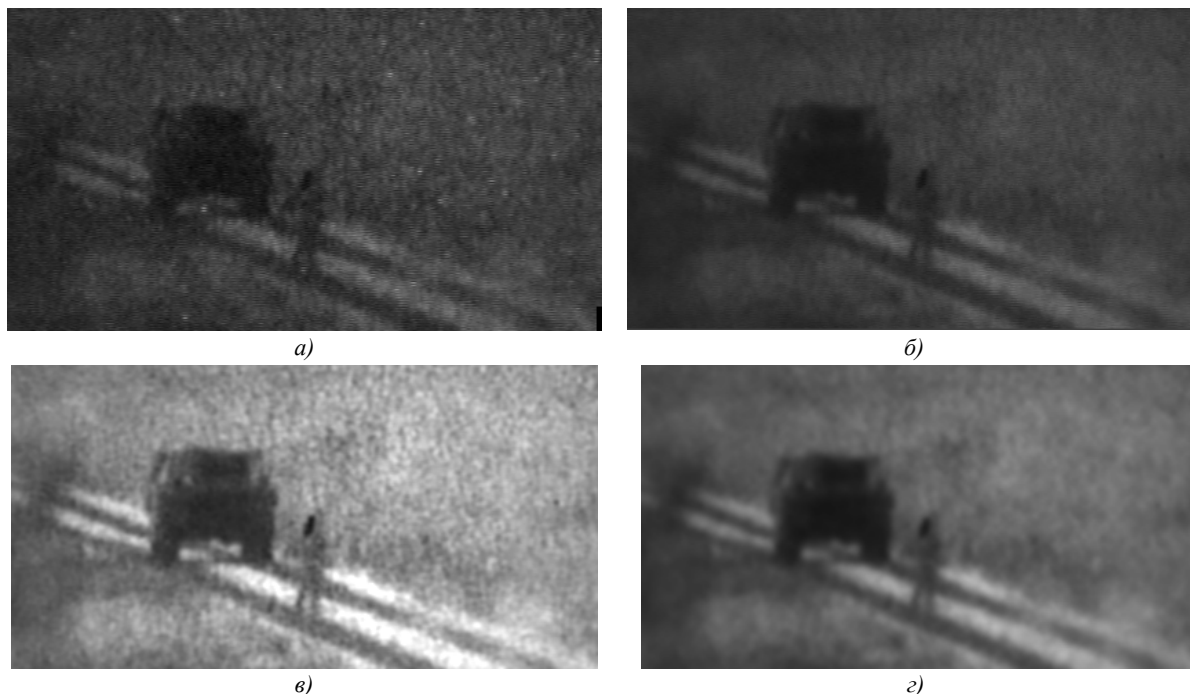


Рис. 3. Результаты восстановления в реальном режиме времени размытого и зашумленного кадра: а) исходное изображение; б) усреднение медианным фильтром; в) предлагаемым методом; з) методом Винера

Новым качеством данного алгоритма является возможность расчета фильтра (5) для случая, когда по дискретному изображению, зарегистрированному МФ (в том числе с малым количеством точек), восстанавливается непрерывное изображение, что позволяет увеличивать разрешения в восстановленном изображении. Отметим, что метод Винера не применим для восстановления частот изображения выше частоты Найквиста [14], а также не определена информационная оценка (10) для восстановления на высоких пространственных частотах для метода Винера [8].

#### 4. Увеличение разрешения изображения в процессе его восстановления

На базе описанного в разд. 1 метода может быть реализован алгоритм увеличения пространственного разрешения изображения в  $N$  раз. Для этого рассчитывается фильтр (см. выражение (5)) с возможностью вычисления значений в дополнительных отсчетах  $(i', j')$ . Основным положением для разработки алгоритма является оптимальность по минимуму среднеквадратической ошибки восстановления непрерывного изображения по дискретным значениям зарегистрированного изображения.

Алгоритм увеличения может быть реализован как быстрый алгоритм. Поскольку вычисление фильтра (5) не зависит от исходного изображения, оно может быть выполнено заранее лишь для нескольких центральных точек, а затем фильтр используется для обработки всего изображения. Для вычисления фильтра на шаге 1 предыдущего алгоритма в выражении (5) выбираются равномерно расположенные вдоль оси  $X$  точки  $i'$  на интервале  $-N \leq i' \leq N$ . Аналогично находят точки вдоль оси  $Y$ .

Кратность увеличения задается пользователем и может принимать целочисленные значения, начиная с 1. В процессе экспериментов установлено, что увеличение в 20 и более раз дает неудовлетворительные визуальные результаты.

Сравнение с известными способами масштабирования изображений посредством бикубической и билинейной интерполяции [15] показывает лучший результат при использовании

предлагаемого подхода (рис. 4). Для численного сравнения результатов увеличения можно использовать коэффициент качества изображения, рассчитанный при помощи подхода [16].

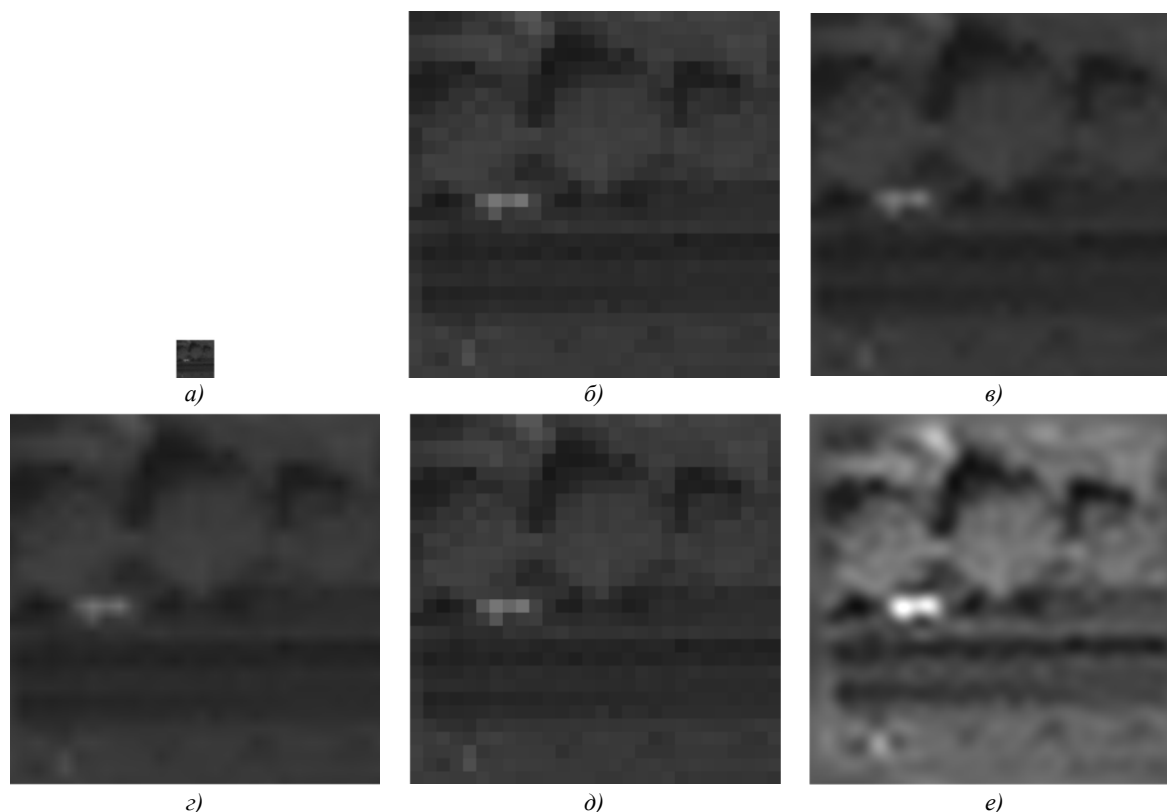


Рис. 4. Результаты увеличения фрагмента изображения при помощи алгоритма восстановления в десять раз: а) исходное изображение с разрешением  $28 \times 28$  пикселей; б) увеличенное при помощи программы CorelDraw; в) увеличенное при помощи алгоритма билинейной интерполяции; г) при помощи бикубической интерполяции; д) при помощи интерполяции по ближайшим соседним пикселям; е) при помощи предлагаемого алгоритма

### Заключение

Предложен быстрый алгоритм восстановления изображений, зарегистрированных опико-электронными системами на основе МФ. Алгоритм позволяет учитывать параметры МФ (отношение «сигнал – шум» и функцию светочувствительности пикселя) и может быть использован для задач повышения качества изображения, регистрируемого системами дистанционного наблюдения.

В работе введена информационная оценка качества системы на основе МФ. Она зависит от максимальной возможной точности восстановления непрерывного изображения по дискретным сигналам  $F_{i,j}$ . Алгоритм позволяет выполнить восстановление и увеличение изображений телевизионного формата в реальном режиме времени. Приведены результаты применения алгоритмов к изображениям, полученным системами ночного видения и со спутников.

### Список литературы

1. Kavaldiev, D. Influence of nonuniform charge-coupled device pixel response on aperture photometry / D. Kavaldiev, Z. Ninkov // Opt. Eng. – Vol. 40. – № 2. – 2001. – P. 162–169.
2. Yadid-Pecht, O. Geometrical modulation transfer function for different pixel active area shapes / O. Yadid-Pecht // Opt. Eng. – Vol. 39. – № 4. – 2000. – P. 859–865.
3. Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – М.: Техносфера, 2005. – 1072 с.



4. Довнар, Д.В. Использование ортогонализации изображений базисных функций для регуляризованного восстановления сигнала / Д.В. Довнар, К.Г. Предко // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 1986. – Т. 26. – № 7. – С. 981–993.
5. Корн, Г. Справочник по математике / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1974 – 832 с.
6. Захаров, И.Л. Геометрический аспект при регистрации изображения матричными фотоприемниками / И.Л. Захаров, Ю.А. Лебединский // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-мат. навук. – 2002. – № 3. – С. 72–78.
7. Обработка изображений и цифровая фильтрация / Т. Хуанг [и др.]. – М.: Мир, 1979. – 320 с.
8. Dovnar, D. The orthogonalization method for error compensation of Wiener filter for spatial discredited images / D. Dovnar, I. Zakharov // Proc. of the Eighth International Conference PRIP'2005. – Minsk, 2005. – P. 173–176.
9. Fellgett, P.B. On the Assessment of Optical Images / P.B. Fellgett, E.H. Linfoot // Phil. Trans. of the Royal Soc. of London. – 1955. – № 931. – P. 369–407.
10. Довнар, Д.В. Приближенное восстановление объекта с использованием уравнений, не имеющих однозначного решения / Д.В. Довнар, К.Г. Предко // Автометрия. – 1989. – № 6. – С. 3–11.
11. Dovnar, D. Informational Assessment of System for Super-resolution Restoration from Several Images / D.V. Dovnar, Yu.A. Lebedinsky, I.L. Zakharov // Proc. of the Seventh all-Ukrainian international conference Signal/Image Processing and Pattern Recognition (UkrOBRAZ'2004). – Kyiv, Ukraine. – P. 217–220.
12. Быстрые алгоритмы в цифровой обработке изображений / Т.С. Хуанг [и др.]. – М.: Радио и связь, 1984.
13. Макаров, А.О. Быстрые алгоритмы вычисления признаков на цифровых изображениях / А.О. Макаров, В.В. Старовойтов. – Минск, 2005. – 40 с. (Препринт / ОИПИ НАН Беларусі; № 1).
14. Information-theoretic assessment of sampled imaging system / F.O. Huck [и др.] // Opt. Eng. – 1999. – Vol. 38. – № 5. – P. 742–762.
15. Довнар, Д.В. Алгоритмы улучшения качества изображений при дистанционном наблюдении со спутника / Д.В. Довнар, И.Л. Захаров, В.В. Старовойтов // Мат. Второго Белорусского космического конгресса. – Минск, 2005. – С. 186–190.
16. Wang, Z. A universal image quality index / Z. Wang, A.C. Bovik // IEEE Signal Processing Letters. – 2002. – Vol. 9. – P. 81–84.

Поступила 30.01.06

*Институт технологии  
металлов НАН Беларусі,  
Могилев, Б.-Бирули, 11  
e-mail: zakharov@ieee.org*

**I.L. Zakharov**

### **ALGORITHM OF IMAGE RESTORATION, REGISTERED BY FOCAL-PLANE ARRAY**

An algorithm for restoration of images, registered by an optical-electronic system based on focal-plane array is described. The algorithm is realized on the basis of linear method of regularized orthogonalization, which is optimal on minimum mean-squared error of image restoration. The algorithm is applied to two problems. The first one is real-time image restoration, the second one is small detail image restoration for zooming purpose. The algorithms are verified on remote sensing images for night vision and satellite observation.