

С. И. Мельник, С. С. Мельник

*Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины
12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина
E-mail: smelnyk@yandex.ru*

РЕКОНСТРУКЦИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ С КРУПНОЙ НЕОДНОРОДНОЙ ДИСКРЕТНОСТЬЮ

В последнее время становится все шире спектр задач, связанных с исследованием структур, элементы изображения которых оказываются за границей приборной разрешающей способности датчиков матричного типа. В связи с этим актуальной является задача их реконструкции за счет применения алгоритмических и информационных методов обработки изображений. Рассмотрены проблемы, возникающие при наблюдении объектов, размеры которых не превышают нескольких пикселей матрицы регистрирующих датчиков. Показано, что перемещение объекта относительно матрицы и использование нескольких последовательных кадров позволяет существенно улучшить точность воспроизведения формы и истинных размеров объекта. При этом измерительная информация может быть представлена как интегралы на трехмерной решетке пространственно-временных пикселей. Предложен алгоритм реконструкции функции неоднородности таких пикселей за счет использования управляемого движения тестового объекта и методов компьютерной томографии. Показана возможность определения относительной скорости движения объекта в каждом из кадров «слепым» методом. Разработан алгоритм реконструкции изображений с крупной неоднородной дискретностью, как при произвольном, так и при их управляемом относительном движении. Ил. 6. Библиогр.: 5 назв.

Ключевые слова: восстановление «смазанных» изображений, тепловизор, крупная дискретизация.

В подавляющем большинстве современных регистрирующих устройств (видеокамеры, тепловизоры, сканеры, томографы, локаторы и т. п.) информация об изображении, непрерывно поступающая с сенсора, записывается в дискретной форме. При этом происходит дискретизация трех видов:

- временная – покадровая разбивка;
- пространственная (одномерная или двумерная) – попиксельная разбивка поля зрения устройства;
- амплитудная – огрубление амплитуды сигнала до ближайшего целого значения шагов шкалы.

В первых двух механизмах дискретизации предусмотрено аналоговое интегрирование непрерывного сигнала по заданному интервалу, в последнем – огрубление полученной интегральной величины до ближайшего дискретного значения. Априорная информация о характере сигнала во многих случаях позволяет восстановить утерянную при дискретизации информацию. Наиболее известный, классический пример такого алгоритма – реконструкция смазанных фотографических изображений [1]. Его суть заключается в использовании априорной информации о том, что во время съемки одного кадра объект не меняет своей формы и движется с постоянной скоростью. В этом случае дискретное значение сигнала $g(n_1; n_2)$ в каждом пикселе $(n_1; n_2)$ изображения может быть получено в виде свертки неискаженной функции профиля $f(n_1; n_2)$ исходного изображения с некоторой функцией $d(n_1; n_2)$, вид которой определяется характером движения объекта относительно матрицы пикселей. С учетом аддитивного шума $w(n_1; n_2)$ можно записать:

$$g(n_1; n_2) = d(n_1; n_2) f(n_1; n_2) + w(n_1; n_2) = \sum_{k_1=0}^{N-1} \sum_{k_2=0}^{M-1} \left[d(n_1; n_2) f(n_1 - k_1; n_2 - k_2) + w(n_1; n_2) \right]. \quad (1)$$

В случае, когда объект движется постоянной скоростью v , под углом φ относительно горизонтальной оси кадра в течение времени экспозиции t_{exp} , происходит «размытие» точечного изображения вдоль отрезка длиной $L = vt_{\text{exp}}$. При этом для непрерывного представления функции $d(n_1; n_2)$ можно записать:

$$d(x; y; L, \varphi) = \begin{cases} \frac{1}{L}, & \text{если } \sqrt{x^2 + y^2} \leq \frac{L}{2}, \\ 0, & \text{в остальных случаях.} \end{cases} \quad (2)$$

При $\varphi = 0$ (скорость направлена вдоль оси x) дискретный аналог этого выражения принимает вид

$$d(n_1; n_2; L) = \begin{cases} \frac{1}{L}, & \text{если } n_1 = 0; |n_2| \leq \left\lfloor \frac{L-1}{2} \right\rfloor, \\ \frac{1}{2L} \left\{ (L-1) - 2 \left\lfloor \frac{L-1}{2} \right\rfloor \right\}, & \text{если } \begin{cases} n_1 = 0 \\ |n_2| = \left\lfloor \frac{L-1}{2} \right\rfloor \end{cases} \\ 0, & \text{в остальных случаях} \end{cases} \quad (3)$$

В этой формуле учтено, что «размытое» вдоль линии движения изображение точечного источника закрывает лишь часть последнего пикселя (длина отрезка L выражена в пикселях).

Так как выражение (1) является сверткой с аддитивным шумом (случайной функцией), реконструкция «смазанного» изображения сводится к применению метода обратной свертки. Эта задача является некорректной (допускает множество решений). Поэтому для получения наибо-

лее правдоподобной реконструкции применяют методы регуляризации [2].

К недостаткам описанного алгоритма следует отнести как общие проблемы, возникающие при решении некорректных задач (потеря устойчивости решения, неоднозначность выбора критерия регуляризации и т. п.), так и априорную неопределенность параметров функции $d(n_1; n_2)$ и случайного шума $w(n_1; n_2)$. Кроме того, шум может оказаться не аддитивным. Его параметры могут зависеть от значений сигнала $f(n_1; n_2)$. В первую очередь эти недостатки проявляются в случаях, когда объект сравнительно мал (его изображение заполняет лишь несколько пикселей), или когда мала его скорость $L \approx 1$. Кроме того, и разные моменты кадра, и разные точки пикселя могут вносить различный весовой вклад в измеряемое дискретное значение сигнала $g(n_1; n_2)$. Это делает используемые алгоритмы малоэффективными в тех случаях, когда технические ресурсы матричного датчика (длительность кадра, размер пикселя, функции неоднородности моментов кадра и точек пикселя и т. п.) не могут обеспечить решение требуемых задач.

В настоящей работе рассматривается задача восстановления «смазанного» изображения в случае измерительных данных с сильной и неоднородной дискретизацией. В частности, будет показано, что использование нескольких кадров съемки движущегося объекта позволяет в соответствующее количество раз повысить разрешающую способность реконструированного изображения. Отметим, что полученные результаты носят предварительный (заявочный) характер и требуют дальнейших экспериментальных и теоретических исследований. Одним из перспективных применений разработанных алгоритмов может быть задача реконструкции тепловизионных изображений. Это связано с тем, что длительность кадра и количество пикселей тепловизионной матрицы существенно отстают от аналогичных параметров приборов оптического диапазона. Приведенные в работе иллюстрации относятся, прежде всего, к обработке тепловизионных изображений.

1. Анализ возможностей восстановления изображения с крупной неоднородной дискретностью за счет априорной информации. Рассмотрим сначала для простоты одномерный дискретный сигнал, полученный при наблюдении движущегося с постоянной скоростью объекта. На рис. 1 показана иллюстрация такого движения. За единицу времени примем длительность кадра, а за единицу длины – размер одного пикселя. При этом габаритный размер объекта мал ($d \approx 1$), а скорость его движения существенно меньше 1.

Кроме того, предположим, что время экспозиции выбрано достаточно малым, чтобы смазыванием изображения в каждом из кадров можно было пренебречь.

Тогда значение дискретного сигнала в каждом пикселе формируется той частью изображения объекта, которая попала в его площадь в момент времени, соответствующий рассматриваемому кадру. Для одномерной линейки пикселей оно может быть вычислено как интеграл от «функции объекта» $U(x)$ по соответствующему отрезку его перекрытия с пикселем.

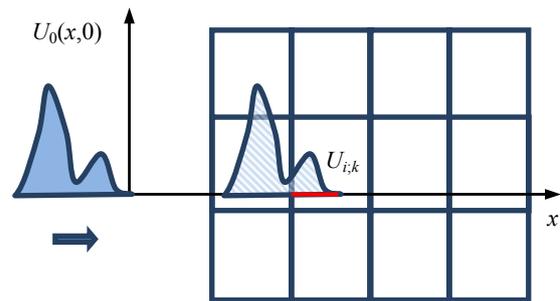


Рис. 1. Схема получения одномерного дискретного сигнала от объекта, движущегося с постоянной скоростью относительно матрицы с большими размерами пикселей

В следующем кадре объект сместится относительно матрицы на малую часть пикселя. При этом к предыдущему интервалу интегрирования добавится малый интервал сзади (по ходу движения) и исчезнет малый интеграл впереди. В простом случае, когда все точки пикселя дают одинаковый вклад в измеряемый сигнал (рис. 2), получим:

$$U_{i;k+1} - U_{i;k} = \int_{x_i}^{x_i+v} U_0(x) dx - \int_{x_i+1}^{x_i+1+v} U_0(x) dx. \quad (4)$$

Фактически каждый из интегралов в правой части уравнения (4) представляет собой сигнал $V_{j;l}$, который был бы получен для виртуального пикселя длиной v (при $\delta t = 1$). Если скорость $v = 1/m$, то в одном реальном пикселе поместится m новых виртуальных пикселей. Тогда получим, что измеряемые значения сигнала $U_{i;k}$ в реальных пикселях являются дискретной сверткой последовательности виртуальных значений $V_{j;l}$ с оконной функцией прямоугольной формы длиной m . Алгоритм восстановления виртуальных значений достаточно очевиден и сводится к решению матричного уравнения. Здесь мы не будем подробно останавливаться на нем, так как далее рассмотрим более общую задачу. В результате пространственная разрешающая способность линейки датчиков может быть улучшена в m раз за счет соответствующего уменьшения разрешаю-

шей способности по времени (увеличения в m раз длительности виртуального кадра).

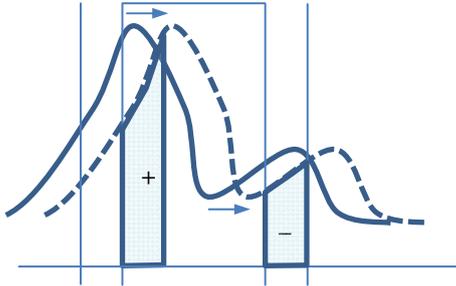


Рис. 2. Схема изменения вкладов от изображения объекта в интегральное значение сигнала при малой скорости движения и относительно больших размерах пикселя

При переходе к рассмотрению двумерной матрицы пикселей мы получим аналогичную задачу, в которой сигнал формируется не на отрезке, а в области перекрытия изображения объекта с площадью пикселя. Для удобства можно рассматривать не движение объекта относительно матрицы пикселей, а смещение пикселей относительно неподвижного объекта. Так, например, при дрожании рук во время съемки площадь одного и того же пикселя по отношению к наблюдаемому объекту будет принимать положения, проиллюстрированные на рис. 3.

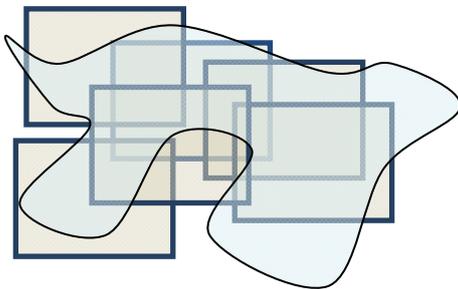


Рис. 3. Положения площади одного того же пикселя по отношению к наблюдаемому объекту для серии последовательных кадров при дрожании рук

Значения сигнала $U_{i;k}$ в каждом из реальных пикселей соответствуют интегралу от непрерывной функции объекта по области перекрытия его с этим пикселем. Если точно знать положение пикселя по отношению к объекту в каждом кадре, то можно составить систему алгебраических уравнений, в которой неизвестными будут значения интегралов в областях, на которые разбивают плоскость пересечения различных положений пикселя. Решая эту систему, мы, как и в одномерном случае, получаем интегральные значения сигнала на множестве более мелких областей (виртуальных пикселей). Таким образом, разрешающая способность изображения с круп-

ной дискретизацией может быть существенно повышена.

В некоторых алгоритмах эту процедуру обеспечивают за счет модификации аппаратного обеспечения. Изображение объекта относительно матрицы смещается на полпикселя в четырех последовательных кадрах, что позволяет с помощью простого алгоритма пересчета повысить виртуальную разрешающую способность матрицы в четыре раза. В других алгоритмах, используемых для обработки тепловизионных изображений, аналогичный эффект достигается за счет использования естественного дрожания рук при съемке [3].

Рассмотренный в этом разделе пример является иллюстративным, так как в нем не учтено размазывание изображения в связи с постоянной скоростью его смещения относительно матрицы. Далее мы сформулируем общую математическую задачу реконструкции истинных границ движущегося объекта с точностью, существенно превышающей ограничения, связанные с дискретизацией измеряемого сигнала.

2. Математическая модель получения сигнала с крупной и неоднородной дискретизацией при движении объекта с постоянной скоростью. Рассмотрим сначала для простоты одномерное сканирование объекта, изображение которого движется с постоянной скоростью относительно матрицы (линейки) датчиков. Пусть: $U_0(x)$ – форма исходного аналогового сигнала (при этом полагаем, что в начальный момент времени начало отсчета совпадает с передней границей объекта, т. е. $U_0(x) = 0$, если $x > 0$); $U(x, t)$ – аналоговый непрерывный сигнал, поступающий на одномерную линейку датчика; v – скорость движения объекта, постоянная в рассматриваемом интервале; δt – длительность одного кадра; $\rho(t_k - t)$ – функция памяти сенсора (весовая функция вклада различных моментов времени в интегральный сигнал k -го кадра); δx – размер одного пикселя; $\mu(x_i - x)$ – функция вклада различных точек в интегральный сигнал i -го пикселя; δU – шаг дискретизации амплитуды сигнала.

3. Постановка и решение прямой задачи.

В случае одномерной модели основная математическая задача восстановления может быть сформулирована следующим образом.

Заданы массив $U_{i;k}$ измеренных дискретных значений суммарной мощности сигнала, регистрируемого устройством в i -м пикселе k -го кадра, функции $\rho(t_k - t)$ и $\mu(x_i - x)$, относительная скорость изображения v , размеры пикселя δx и кадра δt .

Требуется определить форму исходного аналогового сигнала $U_0(x)$.

В качестве дополнительных задач можно рассмотреть задачи определения функций $\rho(t_k - t)$ и $\mu(x_i - x)$ и относительной скорости изображения v на основании наблюдений тестового объекта или же без него (слепой метод). Все эти задачи относятся к классу обратных задач. При учете случайного аддитивного шума они становятся некорректными.

Рассмотрим сначала решение соответствующей прямой задачи. При постоянной скорости движения изображения объекта относительно матрицы датчиков можно записать: $U(x, t) = U(x - vt)$. Для k -го кадра и i -го пикселя дискретного массива данных получим:

$$U_{i,k} = \text{int} \left[\frac{1}{\delta U} \int \int_{x_i, t_k}^{x_i + \delta x, t_k + \delta t} U(x - vt) \begin{bmatrix} \mu(x_i - x) \times \\ \times \rho(t_k - t) \end{bmatrix} dx dt \right]. \quad (5)$$

На рис. 4 величина сигнала $U_{i,k}$ соответствует значению интеграла по площади соответствующей части квадрата с номером (i, k) , закрываемой объектом $U_0(x)$ при его движении с постоянной скоростью. Весовые коэффициенты различных координатных участков пикселя и временных участков кадра на рисунке условно показаны степенью затемнения в каждом из квадратов. Задача реконструкции состоит в максимально точном восстановлении $U_0(x)$ при известных параметрах датчика и значениях дискретного массива данных $U_{i,k}$.

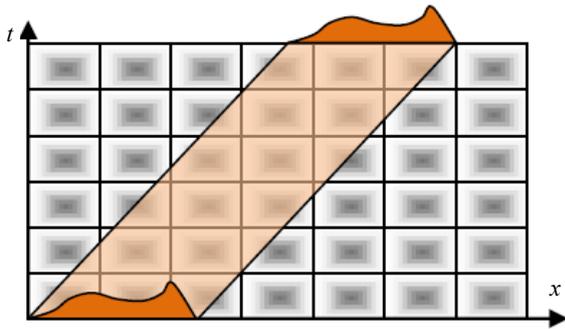


Рис. 4. Схема движения одномерного изображения $U(x, t) = U(x - vt)$ относительно двумерной матрицы пространственно-временных пикселей

Предположим, что как положение объекта относительно границ пикселей, так и скорость его движения известны с требуемой точностью. В результате каждая точка неизвестной функции $U_0(x)$ будет пересекать квадрат по некоторому отрезку (рис. 5).

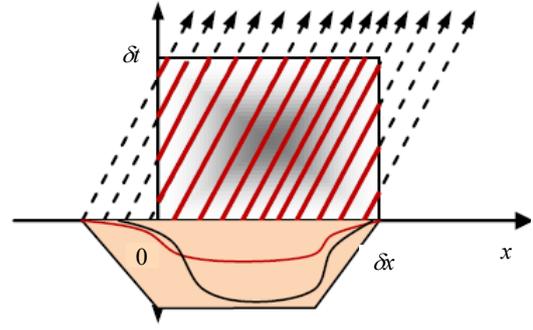


Рис. 5. Схема областей интегрирования (отрезков в площади пространственно-временного пикселя) для различных точек объекта, движущегося относительно линейки пикселей с постоянной скоростью.

Весовой коэффициент вклада от этой точки функции в значение $U_{i,k}$ рассчитывается как интеграл от пространственно-временной характеристики пикселя $\mu(x_i - x) \rho(t_k - t)$ вдоль этого отрезка. Тогда значение $U_{i,k}$ вычисляется как

$$U_{i,k} = \int_{-\infty}^{\infty} U_0(x) G_{i,k}(x - x_i + k v \delta t) dx = \int_{-\infty}^{\infty} U_0(x) G_{i,k}(x - x^*) dx, \quad (6)$$

где $x_i = (i - 1) \delta x$ и

$$G_{i,k}(x) = \begin{cases} \int_{x_i}^{x + v \delta t} \mu(x') \rho\left(\frac{x' - x}{v}\right) dx', & \text{если } x_i - k v \delta t \leq x \leq x_i, \\ \int_x^{x + v \delta t} \mu(x') \rho\left(\frac{x' - x}{v}\right) dx', & \text{если } x_i \leq x \leq x_i + \delta x - k v \delta t, \\ \int_x^{x_i + v \delta t} \mu(x') \rho\left(\frac{x' - x}{v}\right) dx', & \text{если } x_i + \delta x - k v \delta t \leq x \leq x_i + \delta x. \end{cases} \quad (7)$$

В формуле (6) учтено, что в течение k кадров передняя граница пикселя сместится на $k v \delta t$ относительно изображения объекта, а в формуле (7) она совпадает с началом отсчета.

В случае, когда пиксель однороден по площади и по времени кадра, этот интеграл пропорционален длине отрезка. Тогда функция $G(x)$ имеет форму трапеции, а в общем случае рассчитывается на основании известных функций $\mu(x_i - x)$ и $\rho(t_k - t)$ и зависит от скорости v (рис. 5).

4. Решение обратной задачи реконструкции изображения. Перейдем к рассмотрению решения обратной задачи. Полученное выражение (6) является сверткой, и для восстановления искомой функции $U_0(x)$ обычно используют стандартный алгоритм обратной свертки.

Для его реализации необходимо знать функции $U(x^*)$ и $G_{i,k}(x)$. При этом обычно перенебрегают размерами отдельных пикселей. Но в рассматриваемом нами случае крупной дискретизации изображения это приближение некорректно.

Отметим, что функция $U(x^*)$ рассчитывается в конечном наборе дискретных точек $x^* = x_i - k v \delta t$. Это означает, что при точном задании функции $G_{i,k}(x)$ с такой же степенью дискретности мы сможем восстановить и значение функции $U_0(x)$. При этом количество точек, которое может быть использовано для реконструкции, определяется тем временным интервалом $k \delta t$, в течение которого скорость v может считаться постоянной. На рис. 4 оно равно 22 – количеству пространственно-временных пикселей, которые имеют общую площадь со следом от движущегося изображения. В общем случае значения x^* находятся на неодинаковых расстояниях друг от друга, а некоторые из них могут совпадать, поэтому для реализации обратной свертки таких данных требуется специальный алгоритм.

Кроме того, функция $G_{i,k}(x)$ зависит от скорости движения v изображения объекта и функций неоднородности пространственно-временного пикселя $\mu(x_i - x)$ и $\rho(t_k - t)$, в общем случае априорно неизвестных. Поэтому далее рассмотрим некоторые из способов решения задачи реконструкции изображений с крупной неоднородной дискретностью, а также проанализируем проблемы, возникающие при реализации алгоритма.

С учетом особенностей реконструкции изображения, управления процессом регистрации и результатов дополнительных тестовых измерений можно окончательно сформулировать последовательность действий, необходимых для повышения разрешающей способности крупно-дискретных изображений в устройствах с матричными датчиками.

Алгоритм реконструкции изображения

1. Определение функции неоднородности пространственно-временного пикселя с помощью тестового объекта. Одна из возможностей – наблюдение за движением с несколькими разными скоростями тестового «точечного» объекта.

2. Определение относительной скорости движения объекта в каждом из кадров и диапазона кадров, в которых форму объекта можно считать постоянной.

3. Для каждого значения скорости – расчет функции $G(x; y; v)$.

4. Реконструкция $U_0(x)$ с помощью алгоритма обратной свертки (с применением регуляризации методом минимизации алгоритмической сложности описания).

5. Выбор оптимального значения параметров реконструкции (увеличения разрешающей способности, точности задания скоростей и результатов измерений и т. п.) по критерию компактности полученного изображения (сложность функции $U_0(x)$).

5. Особенности решения задачи реконструкции изображений с крупной неоднородной дискретностью

5.1. *Метод тестового объекта для определения функций неоднородности пространственно-временного пикселя.* Одной из возможностей определения скорости движения матрицы относительно изображения объекта (или наоборот) можно рассматривать некоторый тестовый объект (например, точечный источник на однородном фоне), который неподвижен относительно объекта или движется с известной скоростью. Тогда для такого объекта (заданного дельта-функцией) получим матрицу значений:

$$U_{i,k(test)}(x_i) = \int_{-\infty}^{\infty} \delta(x) G_{i,k}(x - x_i) dx = G_{i,k}(x_i). \quad (8)$$

Здесь (x_i) – расстояние (в пикселях) от его угла (начальной координаты отрезка) до той точки, в которой оказывается объект в начале кадра (временного пикселя). Значение $G_{i,k}(x)$ соответствует интегралу от произведения функций $\rho(t)$ и $\mu(x)$ вдоль соответствующего отрезка, по которому след от дельта-функции пересекает пространственно-временной пиксель. В общем случае неоднородность пространственно-временного пикселя характеризуется некоторой функцией $\overline{\rho\mu}(x; t)$. Значения $G_{i,k}(x)$ представляют собой интегралы по траекториям от этой функции. Если провести «сканирование» площади пространственно-временного пикселя по двум различным направлениям, то можно воспользоваться одним из алгоритмов компьютерной томографии (например, преобразованием Радона) для восстановления этой функции. Для такого сканирования достаточно в эксперименте варьировать значения (x_i) с требуемой точностью для двух различных скоростей относительного движения матрицы и изображения (например, соответствующих параллельным диагоналям пикселя). В том случае, когда $\overline{\rho\mu}(x; t)$ можно представить произведением независимых функций $\rho(t)$ и $\mu(x)$, алгоритм восстановления можно упростить.

Кроме того, возможно применение «слепого» метода определения функции неоднородности пространственно-временного пикселя по аналогии с алгоритмами, используемыми в атомно-силовой микроскопии. В этом случае в качестве тестового объекта используют само изображение и адаптируют функцию неоднородности таким образом, чтобы максимально подавить высокие пространственные частоты в спектре реконструируемой функции $U_0(x)$.

5.2. Алгоритм определения локальной относительной скорости движения изображения относительно матрицы. Для определения относительной скорости движения примем следующие предположения:

- Изменением формы объекта в двух последовательных кадрах можно пренебречь.
- Скорость движения изображения относительно матрицы в течение одного кадра можно считать постоянной.

На основании (6) для двух последовательных кадров получим:

$$\frac{IFT_x[G_k(x; v_k)]}{IFT_x[G_{k+1}(x; v_{k+1})]} = \frac{IFT_x[U_k(x^*)]}{IFT_x[U_{k+1}(x^*)]} = f(w_x). \quad (9)$$

Вычисляя функцию $f(w_x)$, зависящую от пространственной частоты, мы получаем возможность (и достаточную информацию) для определения как скорости v_k , так и v_{k+1} .

5.3. Метод минимизации алгоритмической сложности как критерий правдоподобия при решении некорректной задачи реконструкции. Отдельную и достаточно сложную проблему представляет разработка алгоритма оптимальной регуляризации решения обратной некорректной задачи. При наличии даже небольших шумов расчет функции $U_0(x)$ по приведенным выше формулам приводит к возникновению больших «всплесков», не имеющих никакого отношения к реальной форме объекта. В связи с этим применяют методы регуляризации (например, метод сглаживающего функционала [4]), подавляющие этот эффект, но ухудшающие точность реконструкции. Как правило, используемый метод регуляризации определяется субъективным выбором разработчика и лишь в слабой степени связан с априорной информацией об особенностях ожидаемого решения.

Мы предлагаем использование метода минимизации алгоритмической сложности описания, который уже неоднократно применялся нами для решения аналогичных задач. В частности, в работе [5] было показано, что наиболее часто используемые методы (минимизации средне-

квадратичного отклонения, оптимальной спектральной фильтрации, максимального правдоподобия и т. п.) являются частными случаями метода минимизации сложности описания. Это связано с тем, что он позволяет сравнить результаты реконструкции при использовании различной априорной информации о свойствах объекта, шума, прибора и выбрать оптимальный алгоритм. Этот метод по сути является «слепым» методом восстановления не только формы объекта, но и неизвестных параметров процедуры измерения. Его применение позволило в некоторых случаях повысить точность реконструкции в несколько раз по сравнению со стандартными методами.

5.4. Особенности перехода к двумерной реконструкции. В практических задачах почти всегда приходится иметь дело с двумерным изображением. По сравнению с одномерной реконструкцией это не требует каких-либо дополнительных алгоритмов и приближений. Обобщение полученных результатов на двумерную матрицу пикселей (или трехмерную матрицу пространственно-временных пикселей) не вызывает особых затруднений. Поэтому не будем подробно анализировать эту техническую задачу, а лишь отметим некоторые особенности перехода к двумерной задаче:

- Вместо прямоугольных пространственно-временных ячеек дискретизации получаем объемные в виде параллелепипеда.
- Для нахождения функции $G(x, y, v)$ вместо $G(x, v)$ требуется интегрирование функции неоднородности объемного пространственно-временного пикселя по отрезку пересечения параллелепипеда точкой (x, y) , движущейся с заданной скоростью v .
- При определении этой функции методом тестового объекта требуется использование алгоритмов трехмерной томографии.
- При реконструкции требуется применять обратное двумерное преобразование Фурье по пространственным координатам.

5.5. Возможности повышения разрешающей способности путем управления относительным движением камеры и изображения. Как было показано выше, восстановление неизвестной функции $U_0(x)$ осуществляется на основе информации о функции $U(x^*)$, полученной сглаживанием дискретных значений $U_{i,k}$ в конечном множестве точек x^* , являющихся координатами «входа объекта в пиксель». В зависимости от относительной скорости дви-

жения изображения и количества используемых кадров будет меняться и разрешающая способность метода реконструкции. В идеальном случае (отсутствие шумов) алгоритм обратной свертки с использованием обратного дискретного преобразования Фурье позволяет восстановить изображение в количестве точек, равном количеству кадров, за которое точка изображения проходит один пиксель. Это позволяет активными движениями матрицы создавать виртуальное относительное движение объекта, тем самым увеличивая эффективное количество пикселей в несколько раз. Для двумерной матрицы требуется перемещение по двум координатам, что и реализовано в некоторых тепловизорах. Постоянную скорость движения можно обеспечить, оказывая механическое воздействие на элемент оптической системы камеры или вводя дополнительное поворотное зеркало с кулачковым механизмом.

Мы полагаем, что любое аналогичное устройство может быть запрограммировано на требуемое повышение четкости изображения с варьируемым параметром разрешающей способности. Кроме того, в нем возможен одновременный учет и собственных движений камеры (дрожание рук при съемке), и объекта наблюдения.

Широкий спектр возникающих при этом задач и их возможных решений невозможно рассмотреть подробно в рамках данной статьи. Тем не менее, следует отметить, что при использовании метода активного управления движением существует два противоположных фактора.

Во первых, наличие шумов не позволяет рассчитывать на точное решение системы уравнений и получение ожидаемого количества точек разрешения. Поэтому реальное увеличение четкости (после применения метода регуляризации решения) окажется ниже.

С другой стороны, естественные предположения о характере движения изображения (плавное, с ограниченной скоростью, с сохранением пропорций и т. п.) дают априорную информацию, позволяющую существенно улучшить результат реконструкции. В частности, аппроксимация дискретного набора измеренных дискретных значений сигнала $U_{i;k}$ гладкой двумерной поверхностью позволяет произвольным образом выбирать как количество, так и расположение точек, на основании которых проводится реконструкция.

К сожалению, ограниченный объем статьи и ее заявочный характер не позволяют представить подробные результаты экспериментальных исследований предложенных алгоритмов. В последующих публикациях будут подробно рассмотрены экспериментальные аспекты предла-

гаемого метода. Здесь мы только проиллюстрируем их на одном примере. На рис. 6 показаны: необработанное (исходное) тепловизионное изображение объекта (а), его фото (б) и один из промежуточных результатов реконструкции объекта (в), наблюдаемого с помощью тепловизора.

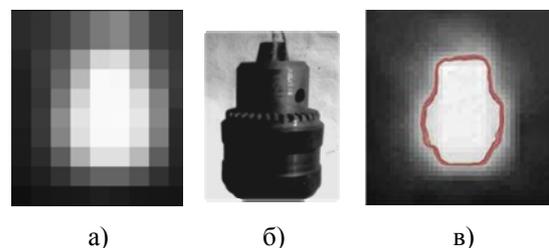


Рис. 6. Пример реконструкции тепловизионного изображения объекта по 16 кадрам, смещенным относительно исходного положения на дробные доли пикселя: а) необработанное изображение (габариты объекта соответствуют 3–5 пикселям матрицы); б) фотография объекта; в) реконструированное тепловизионное изображение объекта

Из рисунка видно, что в результате реконструкции количество виртуальных пикселей может существенно превышать их количество в исходном изображении. При этом контуры теплового изображения (линии максимального градиента температуры) воссоздают форму объекта значительно точнее, чем на исходном, не «смазанном» изображении. Точность определения габаритных размеров объекта на основе реконструированного изображения на порядок выше, чем дискретность матрицы.

Выводы. Применение разработанных выше алгоритмов не ограничивается задачами оптической регистрации изображений. Они могут применяться во всех измерениях, в которых интервал интегрирования сигнала (размер виртуального пикселя) существенно превосходит точность определения начальной точки «входа». В этом случае использование множества измерений при различных начальных координатах этих точек позволяет эффективно повысить точность измерений. Последнее служит основой для построения алгоритма управляемого перемещения камеры с целью симуляции матрицы с n -кратно увеличенным количеством пикселей.

Библиографический список

1. *Legendijk R. L.* Basic methods for image restoration and identification / R. L. Legendijk, J. Biemond. – 1999. – 25 p.
2. *Тихонов А. Н.* Методы решения некорректных задач / А. Н. Тихонов, В. Я. Арсенин. – М.: Наука, 1979. – 283 с.
3. *Тепловизоры Testo: новые возможности.* Технология Super-Resolution [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: [www/URL:http://kip-postavka.ru/testo_cat/SuperResolution.pdf](http://kip-postavka.ru/testo_cat/SuperResolution.pdf). – Загл. с экрана.

4. Морозов В. А. Алгоритмические основы методов решения некорректных задач / В. А. Морозов // Вычисл. методы и программирование. – 2003. – 45, вып. 1. – С. 130–141.
5. Мельник С. И. Теоретико-информационный подход к анализу измерительных данных и оценке их неопределенности / С. И. Мельник // Системы обработки информации: сб. науч. пр. – Х.: ХУ ПС, 2009. – Вып. 5(79). – С. 89–92.

Рукопись поступила 18.12.2015.

S. I. Melnyk, S. S. Melnyk

RECONSTRUCTION OF IMAGES WITH LARGE NON-UNIFORM INCREMENTS

In recent years, the range of tasks related to the study of structures image elements of which are beyond the resolution of matrix type sensors is becoming wider. Thus, the problem of their reconstruction by applying algorithmic and information image processing techniques is relevant. The problems emerging when observing objects whose dimensions do not exceed several pixels of matrix of recorders have been considered. It is shown that motion of the object relative to the matrix and the use of multiple consecutive frames allow to improve the fidelity of shape and true size of the object. This measurement information can be represented as integrals along the trajectories on a three-dimensional lattice of space-time pixels. The reconstruction of a heterogeneity function of pixels through the use of the controlled motion of the test object and methods of computer tomography. The possibility of determining the relative velocity of the object in each of the frames using the blind method has been shown. The algorithm of reconstructing images with large non-uniform incre-

ment during their arbitrary and controlled relative motion has been elaborated.

Key words: restoration of «blurred» images, IR camera, large discretization.

С. І. Мельник, С. С. Мельник

РЕКОНСТРУКЦІЯ ЗОБРАЖЕНЬ З ВЕЛИКОЮ НЕОДНОРІДНОЮ ДИСКРЕТНІСТЮ

Останнім часом поширюється спектр задач, пов'язаних з дослідженням структур, елементи зображення яких виявляються за межею роздільної здатності датчиків матричного типу. У зв'язку з цим актуальною є задача їх реконструкції за рахунок застосування алгоритмічних і інформаційних методів обробки зображень. Розглянуто проблеми, які виникають при спостереженні об'єктів, розміри яких не перевищують декількох пікселів матриці датчиків-реєстраторів. Показано, що рух об'єкта щодо матриці і використання декількох послідовних кадрів дозволяє істотно поліпшити точність відтворення форми і справжніх розмірів об'єкта. При цьому вимірювальна інформація може бути подана як інтеграли за траєкторіями на тривимірній сітці просторово-часових пікселів. Запропоновано алгоритм реконструкції функції неоднорідності таких пікселів за рахунок використання керованого руху тестового об'єкта та методів комп'ютерної томографії. Показано можливість визначення відносної швидкості руху об'єкта в кожному з кадрів «сліпим» методом. Розроблено алгоритм реконструкції зображень з великою неоднорідною дискретністю, як при довільному, так і при їх керованому відносному русі.

Ключові слова: відновлення «змазаних» зображень, тепловізор, велика дискретизація.