

АНАЛИЗ И СИНТЕЗ СИГНАЛОВ И ИЗОБРАЖЕНИЙ

УДК 004.932.2

КОРРЕКЦИЯ ИМПУЛЬСНОГО ОТКЛИКА
СИСТЕМЫ ВИДЕОРЕГИСТРАЦИИ
ПРИ НАКОПЛЕНИИ СЕРИИ
ВЗАИМНО СМЕЩЕННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

В. П. Косых

*Институт автоматизации и электрометрии СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1
E-mail: kosych@iae.nsk.su*

Предложен новый алгоритм обработки серии изображений с низкой частотой дискретизации с целью формирования изображений повышенного разрешения. Алгоритм основан на применении линейного фильтра с ограниченной апертурой, рассчитываемого методом оптимального линейного прогноза. Приводятся экспериментальные оценки качества восстановления изображений повышенного разрешения в зависимости от размера фильтра, количества исходных изображений и уровня аддитивного шума, их сопровождающего.

Ключевые слова: изображение повышенного разрешения, серия изображений, оптимальный линейный прогноз.

Введение. При регистрации изображений матричным фотоприемником, как правило, величина шага дискретизации (а следовательно, и размер фотоприемной ячейки) близка к характерному размеру функции рассеяния точки (ФРТ) оптической системы, формирующей изображение. В этом случае цифровое изображение оказывается несколько «недодискретизованным», что проявляется в элайзинге — возникновении в его спектре паразитных частотных компонент, отсутствующих в наблюдаемом изображении. Ослабления элайзинга можно достичь за счет увеличения частоты дискретизации посредством обработки серии изображений одного и того же сюжета, зарегистрированных с небольшими взаимными сдвигами. В ряде работ, например [1–3], предлагаются различные методы такой обработки. Основная проблема при построении изображения с повышенной частотой дискретизации состоит в выборе способа интерполяции, позволяющего нерегулярно расположенные отсчеты различных кадров серии пересчитать на регулярную решетку, определяющую положение отсчетов улучшенного изображения. В работе [4] предложен способ вычисления интерполяционных коэффициентов, основанный на оптимальном линейном прогнозе (ОЛП). Такой подход, использующий априорные знания о корреляционных зависимостях между близко расположенными отсчетами, обеспечивает устойчивость восстановления даже при «неудачных» взаимных смещениях. Следует подчеркнуть, что целью упомянутых работ является только повышение частоты дискретизации изображения, регистрируемого на выходе оптической системы. Однако, если ФРТ системы известна, применение аналогичной методики позволяет получить оценку входного изображения, в значительной степени ослабив дефокусирующее влияние ФРТ, и тем самым реально повысить разрешение в накопленном изображении.

Восстанавливающий фильтр. Предположим, как и в [4], что в нашем распоряжении имеется M дискретных выборок $d_m(i, j)$, $m = \overline{0, M-1}$, одного и того же непрерывного изображения

$$d(x, y) = h(x, y) * g(x, y), \quad (1)$$

отличающихся друг от друга только малыми сдвигами и присутствием шума:

$$d_m(i, j) = d(i\Delta + \delta_m, j\Delta + \varepsilon_m) + n_m(i, j), \quad \delta_m, \varepsilon_m < 1, \quad \delta_0, \varepsilon_0 = 0, \quad m = \overline{0, M-1}. \quad (2)$$

Здесь $g(x, y)$ — входное изображение; $d(x, y)$ — изображение, формируемое пространственно-инвариантной линейной оптической системой в плоскости фотоприемного устройства; $h(x, y)$ — ФРТ оптической системы; символом «*» обозначена операция двумерной свертки. Шаг дискретизации Δ полагаем далее равным единице, сдвиги δ_m, ε_m — известными.

Цель данной работы заключается в том, чтобы по серии изображений с низкой частотой дискретизации $d_m(i, j)$ восстановить наблюдаемое изображение $g(x, y)$, т. е. построить его дискретную оценку

$$g(i + sp, j + sq), \quad 0 \leq p, q < k, \quad (3)$$

с шагом дискретизации $s = 1/k$, где $k > 1$ — целое число (в отличие от [4], где необходимо было получить оценку $d(i + sp, j + sq)$ — изображения, искаженного действием ФРТ).

В качестве оценки возьмем линейную комбинацию отсчетов исходных выборок, лежащих в некоторой окрестности Ω узла (i, j) :

$$\hat{g}(i + sp, j + sq) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{t_1, t_2 \in \Omega} r_{mpq}(t_1, t_2) d_m(i + t_1, j + t_2) = \mathbf{r}_{pq}^T \mathbf{d}, \quad (4)$$

где $r_{mpq}(t_1, t_2)$ — весовые коэффициенты, с которыми отсчеты исходных выборок входят в комбинацию; \mathbf{d} — вектор, построенный из упорядоченных некоторым образом отсчетов окрестности Ω , принадлежащих всем выборкам; \mathbf{r}_{pq} — вектор аналогично упорядоченных весовых коэффициентов. Согласно методу оптимального линейного прогноза весовые коэффициенты выбираются так, чтобы минимизировать математическое ожидание ошибки восстановления:

$$J(\mathbf{r}_{pq}) = E\{[g(i + sp, j + sq) - \hat{g}(i + sp, j + sq)]^2\}. \quad (5)$$

В предположении, что наблюдаемое изображение является реализацией стационарного случайного процесса, оценка вектора весовых коэффициентов, минимизирующего функционал (5), имеет вид

$$\hat{\mathbf{r}}_{pq} = \mathbf{K}_d^{-1} \mathbf{v}_{gd}(p, q). \quad (6)$$

Здесь $\mathbf{K}_d = E\{\mathbf{d}\mathbf{d}^T\}$ — автокорреляционная матрица отсчетов зарегистрированных изображений, входящих в окрестность Ω , тогда как $\mathbf{v}_{gd}(p, q) = E\{g(i + sp, j + sq)\mathbf{d}\}$ — вектор взаимной корреляции между теми же отсчетами и значением входного изображения в отличие от [4], где \mathbf{v} — вектор взаимной корреляции между зарегистрированными отсчетами и прогнозируемым значением одного и того же изображения. По этой причине получить оценку кросскорреляционного вектора непосредственно из зарегистрированных изображений не представляется возможным.

Полагая, что входное изображение достаточно широкополосное, его автокорреляционную функцию можно считать близкой к дельта-функции. ФРТ оптической системы можно представить в виде свертки двух ФРТ: оптики, проецирующей изображение в плоскость

фотоприемника, и ячейки фотоприемника, осуществляющей пространственное интегрирование изображения в пределах своей площади. Первую можно аппроксимировать двумерной гауссоидой

$$w(x, y) = \frac{1}{2\pi\rho^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\rho^2}\right), \quad (7)$$

а вторую (для квадратной ячейки) — функцией

$$\Pi(x, y) = \frac{1}{\Delta^2} \begin{cases} 1, & |x, y| < \Delta/2, \\ 0, & \text{если иначе.} \end{cases} \quad (8)$$

Тогда автокорреляционная функция зарегистрированного изображения принимает вид

$$K_d(\tau_x, \tau_y) = \sigma_g^2 w(x, y) * w(x, y) * \Pi(x, y) * \Pi(x, y) + \sigma_n^2 \delta(\tau_x, \tau_y),$$

а кросскорреляционная функция входного и выходного изображений —

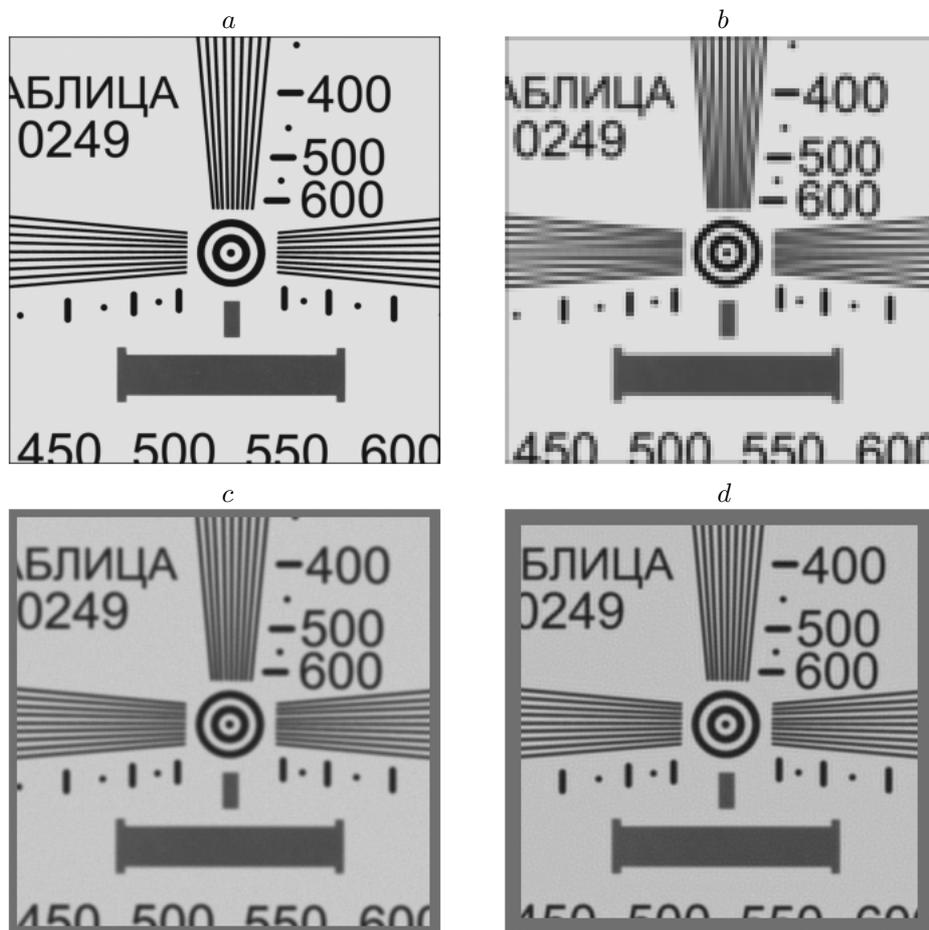
$$K_{gd}(\tau_x, \tau_y) = \sigma_g^2 w(x, y) * \Pi(x, y).$$

Здесь $\delta(x, y)$ — дельта-функция; σ_g^2 и σ_n^2 — дисперсии входного изображения и шума регистрации. Шум регистрации предполагается некоррелированным. Технология построения автокорреляционной матрицы \mathbf{K}_d и кросскорреляционного вектора \mathbf{v}_{gd} по известным авто- и кросскорреляционным функциям описана в [4].

Вычислительный эксперимент. Возможности предлагаемого подхода демонстрируются результатами вычислительного эксперимента. В этом эксперименте из детального цифрового изображения телевизионной таблицы формировались эталонное изображение, имитирующее входное изображение, и серия взаимно смещенных недодискретизованных изображений. Восстановление выполнялось в соответствии с приведенным алгоритмом в предположении, что взаимные сдвиги изображений неизвестны. Сдвиги оценивались посредством методики, приведенной в [5]. Восстановленное изображение сравнивалось с эталонным и изображением с повышенной частотой дискретизации, полученным из той же серии изображений с помощью интерполяции, основанной на ОЛП [4]. Качество восстановления характеризовалось величиной

$$S = \frac{\sigma(I_{\text{rest}} - I_{\text{ref}})}{\sigma(I_{\text{ref}})},$$

где σ — среднее квадратичное отклонение I_{ref} — эталонное изображение; I_{rest} — восстановленное изображение. Для получения серии взаимно смещенных недодискретизованных изображений цифровое изображение фрагмента телевизионной таблицы высокого разрешения подвергалось свертке с ядром (7), имитирующим ФРТ оптической системы, и скользящему усреднению окном размером $\Delta \times \Delta$ элементов, имитирующим интегрирование на элементе фотоприемника, с последующим прореживанием с шагом Δ . Взаимные сдвиги реализовывались изменением начала выборки при прореживании. Для получения изображений таблицы, заметно искаженных ФРТ и дискретизацией, было выбрано значение $\Delta = 21$. Эталонное изображение строилось аналогично при $\Delta = 7$. Таким образом, восстановление выполнялось с утроенной частотой дискретизации ($k = 3$). Для ФРТ в обоих случаях устанавливалось значение $\rho = 0,25\Delta$. Изображения, используемые для восстановления, искажались аддитивным некоррелированным нормальным шумом с нулевым средним значением и дисперсией σ_n^2 . Приведенные на рисунке результаты соответствуют отношению шум/сигнал $\sigma_n/\sigma(I_{\text{ref}}) = 0,05$ и окрестности Ω , состоящей из 24 точек (в



Восстановление изображения повышенного разрешения по серии искусственно недодискретизированных изображений: *a* — эталонное изображение; *b* — одно из серии изображений с низкой частотой дискретизации (трехкратно увеличенное посредством билинейной интерполяции); *c* — изображение с утроенной частотой дискретизации, построенное посредством интерполяции, основанной на ОЛП; *d* — изображение повышенного разрешения с утроенной частотой дискретизации, построенное с помощью предложенного алгоритма

каждом кадре). Восстановление выполнено по 25 изображениям, сдвиги которых относительно одного из них распределены равномерно случайным образом в диапазоне $[-0,5; 0,5]$ по обеим координатам. Сопоставляя рисунки, *c* и *d*, можно обнаружить заметное повышение четкости в восстановленном изображении по сравнению с изображением, в котором посредством ОЛП-интерполяции просто увеличена частота дискретизации. В таблице приведены оценки качества восстановления и интерполяции при различных условиях. Здесь nf — количество изображений, используемых при восстановлении; npt — количество точек, попадающих из каждого кадра в окрестность Ω при восстановлении; S_{int} — значение критерия качества при интерполяции (для интерполяционного алгоритма всегда $npt = 4$, поэтому некоторые значения в колонке не указаны); S_{rest} — значение критерия качества при восстановлении.

На основе приведенных в таблице данных можно сделать следующие выводы.

1. Предложенный алгоритм восстановления обеспечивает значительное улучшение качества накопленного изображения по сравнению с интерполяционным алгоритмом (столбцы S_{rest} и S_{int}).

$\sigma_n/\sigma(I_{\text{ref}})$	nf	npt	S_{int}	S_{rest}
0	25	24	0,383	0,172
0	25	12	—	0,181
0	25	8	—	0,228
0	13	24	0,399	0,256
0	13	12	—	0,266
0,05	25	24	0,385	0,176
0,05	25	12	—	0,185
0,05	25	8	—	0,232
0,05	13	24	0,401	0,259
0,05	13	12	—	0,268
0,10	25	24	0,386	0,187
0,10	25	12	—	0,197
0,10	25	8	—	0,244
0,10	13	24	0,408	0,266
0,10	13	12	—	0,273

2. Наличие даже значительного шума (отношение шум/сигнал до 10 %) в накапливаемых изображениях оказывает слабое влияние на качество восстановления, по крайней мере, когда количество накапливаемых кадров превышает величину k^2 .

3. Увеличение количества накапливаемых изображений влияет на качество восстановления сильнее, чем на качество интерполяционного накопления. Действительно, относительное улучшение

$$\frac{S(nf = 13) - S(nf = 25)}{S(nf = 13) + S(nf = 25)}$$

для режима восстановления более чем пятикратно превышает эту величину для режима интерполяции при всех уровнях шума.

4. Сравнивая при любом уровне шума отношения

$$\frac{S_{\text{rest}}(npt = 24) - S_{\text{rest}}(npt = 12)}{S_{\text{rest}}(npt = 24) + S_{\text{rest}}(npt = 12)} \quad \text{и} \quad \frac{S_{\text{rest}}(npt = 24) - S_{\text{rest}}(npt = 8)}{S_{\text{rest}}(npt = 24) + S_{\text{rest}}(npt = 8)},$$

можно заметить, что увеличение окрестности Ω слабо сказывается на качестве восстановления, если размер окрестности заметно превышает характерный размер ФРТ. Поскольку размер ФРТ обычно меньше шага дискретизации исходных изображений, размер окрестности в 4–5 шагов вполне достаточен для получения высокого качества восстановления.

Заключение. Результаты вычислительного эксперимента показывают, что при обработке серии взаимно смещенных изображений при наличии априорных сведений о ФРТ регистрирующей системы применение оптимального линейного прогноза наряду с построением изображения с повышенной частотой дискретизации позволяет повысить разрешающую способность этого изображения, что проявляется в увеличении четкости отображения резких яркостных переходов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kim S. P., Bose N. K., Valenzuela H. M. Recursive reconstruction of high resolution image from noisy undersampled multiframe // IEEE Trans. Acoust., Speech and Signal Proc. 1990. **38**, N 6. P. 1013–1027.

2. **Alam M. S., Bognar J. G., Hardie R. C., Yasuda B. J.** High resolution infrared image reconstruction using multiple, randomly shifted, low resolution, aliased frames // SPIE. 1997. **3063**. P. 102–112.
3. **Young S. S., Driggers R. G.** Superresolution image reconstruction from a sequence of aliased imagery // Appl. Opt. 2006. **45**, N 21. P. 5073–5085.
4. **Иванов В. А., Киричук В. С., Косых В. П.** Формирование изображения повышенного разрешения по серии взаимно смещенных изображений посредством оптимального линейного прогноза // Автометрия. 2009. **45**, № 2. С. 3–13.
5. **Иванов В. А., Киричук В. С., Косых В. П.** Оценивание субпиксельного сдвига дискретных изображений // Автометрия. 2007. **43**, № 3. С. 15–30.

Поступила в редакцию 17 июля 2009 г.
