

УДК 621.391

## ОЦЕНКА ИСКАЖЕНИЙ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПРИ СУБПИКСЕЛЬНОМ СДВИГЕ КАМЕРЫ

А.В. ЗАХАРЕНКО, О.Г. ШЕВЧУК, В.Ю. ЦВЕТКОВ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь**Поступила в редакцию 9 марта 2021*

**Аннотация.** Разработан алгоритм формирования изображений низкого пространственного разрешения. Алгоритм основан на использовании изображения высокого пространственного разрешения для генерирования изображений низкого пространственного разрешения, смещенных друг относительно друга на доли пикселя в низком разрешении. Произведена оценка искажений изображений при субпиксельном сдвиге с использованием среднеквадратичной ошибки.

*Ключевые слова:* субпиксельный сдвиг, изображения, среднеквадратичная ошибка.

### Введение

В ряде случаев необходимо накопление изображений для повышения отношения сигнал-шум при передаче данных. Для этого требуется высокая точность пространственного совпадения изображений, полученных в различные моменты времени. В этой связи актуальной задачей является оценка искажений изображений при субпиксельном смещении видеокамеры. Данная задача может быть решена с использованием методов физического или программного моделирования. Один из вариантов программного моделирования основан на использовании изображения высокого пространственного разрешения с достаточно высоким числом деталей для получения изображений низкого пространственного разрешения с помощью смещения окна аппроксимации, определяющего значения пикселей в изображении низкого разрешения. При этом могут использоваться следующие алгоритмы: ближайшего соседа [1]; билинейная интерполяция [2]; бикубическая интерполяция [3]; свертка [4]; суперсемплинг [5].

В алгоритме ближайшего соседа пиксель итогового изображения низкого разрешения формируется путем копирования одного наиболее близкого по положению пикселя исходного изображения высокого разрешения. Недостатком алгоритма является потеря мелких деталей и зернистость итогового уменьшенного изображения. В алгоритме билинейной интерполяции для формирования каждого пикселя уменьшенного изображения используются  $2 \times 2$  пикселей исходного изображения. Алгоритм нельзя применять для уменьшения более чем в 2 раза. При уменьшении до двух раз имеется заметный алиасинг. Бикубическая интерполяция работает по тому же принципу, что и билинейная, но для каждого пикселя уменьшенного изображения используются  $4 \times 4$  пикселей исходного изображения. Алгоритм, использующий свертку, похож на алгоритмы билинейной и бикубической интерполяции, но вместо фиксированного количества пикселей используется количество, пропорциональное масштабу. Вклад каждого исходного пикселя в конечный определяется фильтром. При суперсемплинге исходное изображение разбивается на участки, равные количеству пикселей итогового изображения. Для формирования одного пикселя изображения низкого разрешения рассчитывается сумма всех пикселей, вошедших в площадь участка. Разбиение на участки может быть с округлением до ближайшего целого числа пикселей и без округления.

Рассмотренные алгоритмы позволяют изменить пространственное разрешение изображений, сохранив их структуру с необходимой точностью. Качество сформированного изображения будет тем выше, чем больше информации в него попадет из исходного изображения.

Целью работы является разработка алгоритма и программной модели формирования изображений с субпиксельным сдвигом и оценка его влияния на структуру изображений.

### Алгоритм формирования изображений низкого пространственного разрешения

Предложенный алгоритм формирования изображений низкого пространственного разрешения, смещенных друг относительно друга на доли пикселя в низком разрешении, может использоваться для уменьшения разрешения изображений в  $S = 2^N$  раз, где  $S$  – коэффициент масштабирования, а  $N$  – целое положительное число. При этом количество получаемых изображений совпадает с коэффициентом масштабирования. Для формирования серии перекрывающихся изображений низкого пространственного разрешения из изображения высокого пространственного разрешения коэффициент масштабирования  $S$  должен округляться до ближайшего целого с избытком. Блок-схема алгоритма представлена на рис. 1.

Исходными данными для алгоритма формирования изображений низкого пространственного разрешения является изображение высокого разрешения  $I = \{i(y, x)\}_{y=0, \overline{Y-1}, x=0, \overline{X-1}, Y=X}$ .

Предложенный алгоритм состоит из следующих основных шагов:

1. Обработка исходного изображения  $I = \{i(y, x)\}_{y=0, \overline{Y-1}, x=0, \overline{X-1}, Y=X}$ .

В первом шаге происходит загрузка исходного изображения  $I = \{i(y, x)\}_{y=0, \overline{Y-1}, x=0, \overline{X-1}, Y=X}$  в формате bmp и определение размерности матрицы, содержащей исходное изображение.

2. Выбор пикселя  $i(y, x)_{y=0, \overline{Y-1}, x=0, \overline{X-1}}$ .

Пиксель  $i(y, x)_{y=0, \overline{Y-1}, x=0, \overline{X-1}}$  выбирается в левом верхнем углу матрицы  $I = \{i(y, x)\}_{y=0, \overline{Y-1}, x=0, \overline{X-1}, Y=X}$ , содержащей исходное изображение.

3. Формирование матрицы  $I_1 = \{i_1(y, x)\}_{y=0, \overline{\frac{Y}{S}-1}, x=0, \overline{\frac{X}{S}-1}}$ , содержащей изображение низкого пространственного разрешения.

От выбранного пикселя строится матрица скользящего окна  $I' = \{i'(y, x)\}_{y=0, \overline{S-1}, x=0, \overline{S-1}}$ . Вычисление значения суперпикселя, которое является средним арифметическим значением

яркости пикселей скользящего окна, выполняется по формуле  $P = \frac{\sum_{n=0}^{S-1} \sum_{m=0}^{S-1} i'(y, x)}{S^2}$ .

Полученное значение суперпикселя  $P$  заносится в матрицу  $I_1 = \{i_1(y, x)\}_{y=0, \overline{\frac{Y}{S}-1}, x=0, \overline{\frac{X}{S}-1}}$ . Для заполнения всей матрицы  $I_1$  выполняется сдвиг матрицы  $I'$  на  $S$  пикселей слева направо сверху вниз, пока матрица  $I_1$  не будет заполнена до конца.

4. Сохранение матрицы  $I_1 = \{i_1(y, x)\}_{y=0, \overline{\frac{Y}{S}-1}, x=0, \overline{\frac{X}{S}-1}}$ .

Матрица  $I_1 = \{i_1(y, x)\}_{y=0, \overline{\frac{Y}{S}-1}, x=0, \overline{\frac{X}{S}-1}}$ , содержащая изображение низкого пространственного разрешения сохраняется в виде изображения в формате bmp.

5. Формирование серии перекрывающихся изображений низкого пространственного разрешения  $I_s = \{i_s(y, x)\}_{y=0, \overline{\frac{Y}{S}-1}, x=0, \overline{\frac{X}{S}-1}}$ , при  $s = \overline{2, S}$ .

Для формирования серии перекрывающихся изображений низкого пространственного разрешения  $I_s = \{i_s(y, x)\}_{y=0, \overline{\frac{Y}{S}-1}, x=0, \overline{\frac{X}{S}-1}}$  при  $s = \overline{2, S}$  количеством  $S$  штук от выбранного пикселя

$i(y, x)_{y=0, \overline{Y-1}, x=0, \overline{X-1}}$  производится сдвиг на 1 пиксель по диагонали. Далее снова повторяется шаг 3,

с помощью которого формируется новое изображение низкого разрешения, сдвинутое от предыдущего на 1 пиксель. Алгоритм заканчивается, когда формируется  $S$  матриц низкого разрешения размерностью  $\frac{Y}{S} \times \frac{X}{S}$  пикселей.

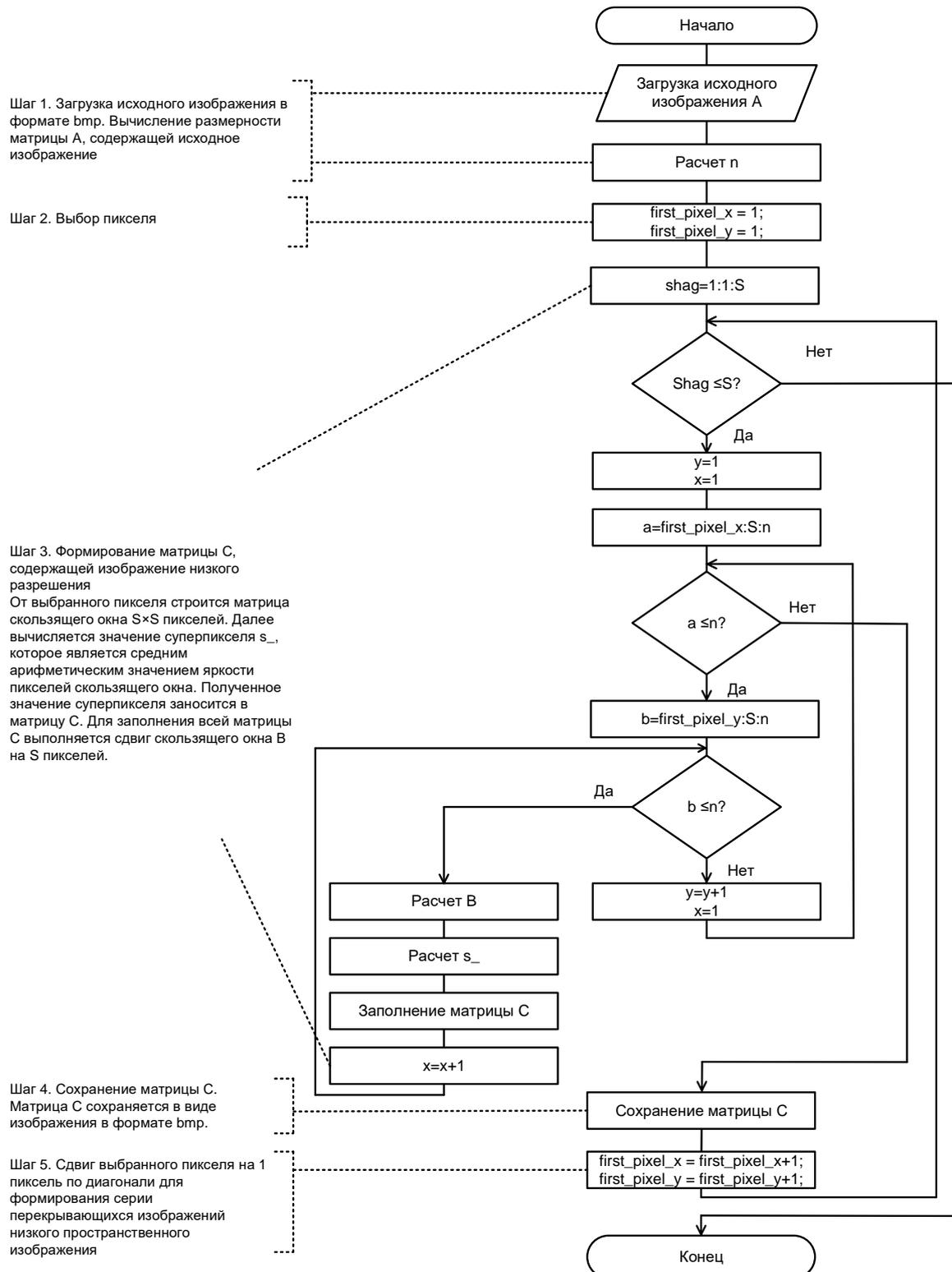


Рис. 1. Блок-схема алгоритма формирования изображений низкого пространственного разрешения

5. Формирование серии перекрывающихся изображений низкого пространственного разрешения  $I_s = \{i_s(y, x)\}_{y=0, \frac{Y}{S}-1, x=0, \frac{X}{S}-1}$ , при  $s = 2, S$ .

Для формирования серии перекрывающихся изображений низкого пространственного разрешения  $I_s = \{i_s(y, x)\}_{y=0, \frac{Y}{S}-1, x=0, \frac{X}{S}-1}$  при  $s = 2, S$  количеством  $S$  штук от выбранного пикселя

$i(y, x)_{y=0, Y-1, x=0, X-1}$  производится сдвиг на 1 пиксель по диагонали. Далее снова повторяется шаг 3, с помощью которого формируется новое изображение низкого разрешения, сдвинутое от предыдущего на 1 пиксель. Алгоритм заканчивается, когда формируется  $S$  матриц низкого разрешения размерностью  $\frac{Y}{S} \times \frac{X}{S}$  пикселей.

### Оценка эффективности алгоритма преобразования изображения высокого пространственного разрешения в серию перекрывающихся изображений низкого пространственного разрешения

Разработанный алгоритм реализован в среде Matlab. Для сравнительной оценки использованы алгоритмы билинейной и бикубической интерполяции. Эксперимент проведен на ЭВМ со следующими техническими характеристиками: процессор Intel(R) Core(TM) i5-3340M @ 3,4 ГГц; ОЗУ – 8 ГБ; тип системы – 64-разрядная операционная система Windows 10.

Для тестирования алгоритмов использовались изображения, представленные на рис. 2.

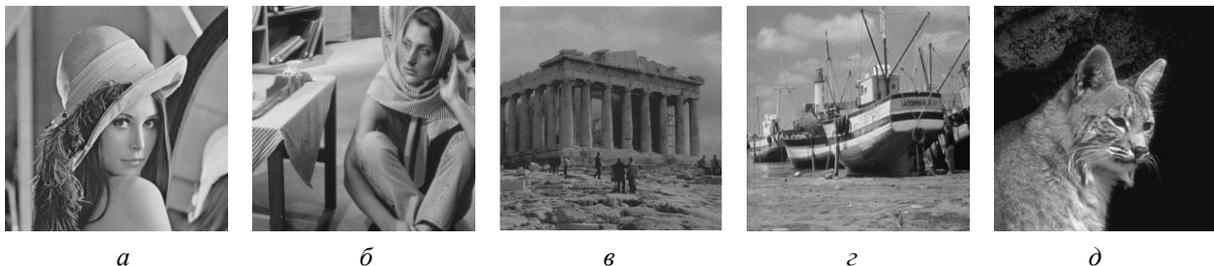


Рис. 2. Тестовые изображения высокого разрешения: *a* – изображение 1; *б* – изображение 2; *в* – изображение 3; *г* – изображение 4; *д* – изображение 5

В качестве критерия эффективности используется значение среднеквадратической ошибки (MSE). Значение среднеквадратической ошибки рассчитывается по следующим формулам:

1. Для оценки подобию изображений с разным сдвигом при использовании разработанного алгоритма:

$$MSE = \frac{1}{N^2} \sum_{i=0}^{n-1} (X_i - X_i')^2,$$

где  $X_i$  – значение  $i$ -го пикселя изображения, сформированного предложенным алгоритмом,  $X_i'$  – значение  $i$ -го пикселя изображения, сдвинутого относительно изображения  $X_i$  на пиксель,  $N^2$  – общее число пикселей изображения.

2. Для сравнительной работы тестируемых алгоритмов:

$$MSE = \frac{1}{N^2} \sum_{i=0}^{n-1} (X_i - X_i'')^2,$$

где  $X_i$  – значение  $i$ -го пикселя изображения, сформированного предложенным алгоритмом,  $X'_i$  – значение  $i$ -го пикселя изображения, сформированного алгоритмом билинейной или бикубической интерполяции,  $N^2$  – общее число пикселей изображения.

На рис. 3 представлено исходное изображение высокого разрешения и изображение низкого пространственного разрешения, сформированное с помощью алгоритма формирования изображений низкого пространственного разрешения.



Рис. 3. Результат работы алгоритма формирования изображений низкого пространственного разрешения:  $a$  – исходное изображение высокого разрешения;  $b$  – изображение низкого пространственного разрешения

Так как предложенный алгоритм формирует серию перекрывающихся изображений низкого пространственного разрешения, то наличие перекрытия позволяет оценить подобие изображений. Для этого может использоваться значение среднеквадратичной ошибки.

Значение среднеквадратичной ошибки вычисляется от изображений с разным сдвигом. На рис. 4 представлены изображения низкого пространственного разрешения, сдвинутые на 1, 16 и 32 пикселя.

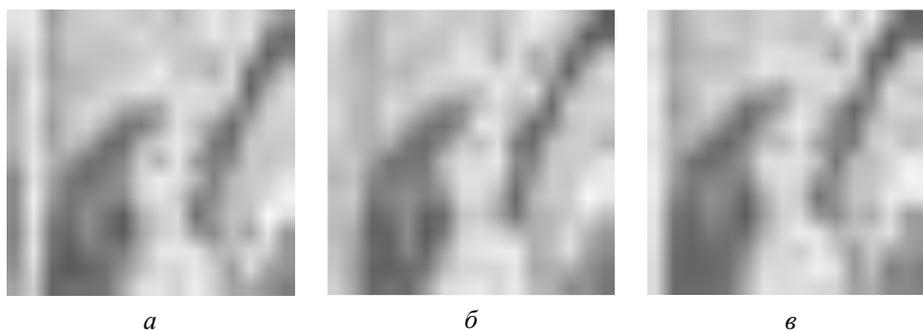


Рис. 4. Изображения низкого пространственного разрешения, сгенерированные предложенным алгоритмом, с разной величиной сдвига:  $a$  – 1 пикселей;  $b$  – 16 пикселей;  $c$  – 32 пикселя

Зависимость среднеквадратичной ошибки MSE серии перекрывающихся изображений от величины диагонального сдвига между ними ( $n$ ) приведена на рис. 5.

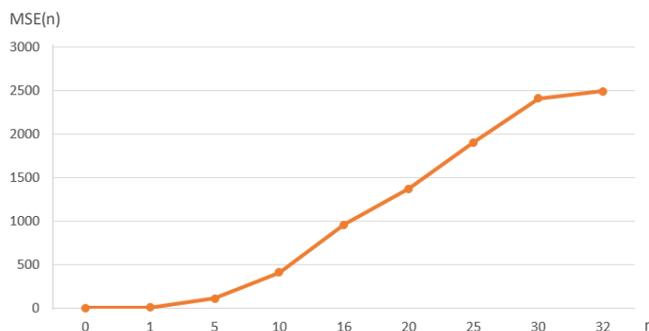


Рис. 5. Зависимость среднеквадратичной ошибки изображений от величины диагонального сдвига

При сдвиге полученных изображений низкого разрешения на 1 пиксель значение среднеквадратичной ошибки равняется 4,4727, что свидетельствует о высокой степени идентичности изображений. Увеличение сдвига приводит к увеличению значения среднеквадратичной ошибки и, следовательно, к снижению схожести изображений.

На рис. 6 представлены результаты обработки изображений с помощью алгоритма преобразования изображения высокого пространственного разрешения в серию перекрывающихся изображений низкого пространственного разрешения и алгоритмов билинейной и бикубической интерполяции.

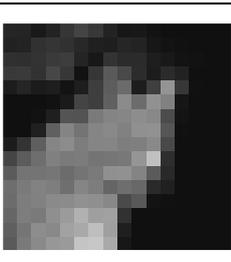
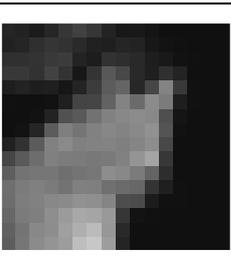
Исходное изображение ВР	Предложенный алгоритм	Билинейная интерполяция	Бикубическая интерполяция
			
			
			
			
			

Рис. 6. Результаты обработки изображений

В таблице представлены полученные значения MSE при сравнении изображений, сгенерированных с помощью алгоритма формирования изображений низкого пространственного разрешения, относительно изображений, полученных при использовании алгоритмов билинейной и бикубической интерполяции.

## Рассчитанное значение MSE для тестовых изображений

Тестовое изображение	Алгоритм интерполяции	
	Билинейная интерполяция	Бикубическая интерполяция
Изображение 1	48,4570	17,8945
Изображение 2	44,7461	19,5312
Изображение 3	10,4102	8,8906
Изображение 4	29,1563	15,6523
Изображение 5	16,5469	8,1133

Среднее значение MSE при сравнении предложенного алгоритма с алгоритмом билинейной интерполяции составило 29,8633. При сравнении предложенного алгоритма с алгоритмом бикубической интерполяции среднее значение MSE равняется 14,0164. Сформированное предложенным алгоритмом изображение близко по качеству к изображению, полученному алгоритмом бикубической интерполяции, как по значению MSE, так и по визуальной оценке.

## Заключение

Предложен алгоритм формирования изображений низкого пространственного разрешения. Показано, что при формировании серии изображений низкого пространственного разрешения, при увеличении сдвига между изображениями, их идентичность в среднем снижается в 2 раза. При сравнении с алгоритмами билинейной и бикубической интерполяции, предложенный алгоритм формирует изображения наиболее близкие по значению MSE к методу бикубической интерполяции.

ESTIMATION OF IMAGE DISTORTIONS  
WITH SUB-PIXEL SHIFT OF THE CAMERA

A.V. ZAKHARENKO, O.G. SHEVCHUK, V.Yu. TSVIATKOU

**Abstract.** An algorithm for the formation of images of low spatial resolution has been developed. The algorithm is based on the use of high spatial resolution images to generate low spatial resolution images offset from each other by fractions of a pixel in low resolution. The estimation of distortions of images at subpixel shift using the root mean square error has been made.

*Keywords:* subpixel shift, images, MSE.

## Список литературы

1. Blu T. // IEEE Transactions on Image Processing. 2004. Vol. 13. P. 710–719.
2. Thevenaz P., Blu T. // IEEE Transactions on Medical Imaging. 2000. Vol. 19. P. 739–758.
3. Wilhelm B., Burge M. J. // Springer-Verlag. 2009. Vol. 7. P. 327
4. Turkowski K. // Graphics gems.1990. P. 147–165.
5. Yang W., Zhang X., // IEEE Transactions on Image Processing. 2018. Vol. 20. P. 512– 520.