

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ АЛГОРИТМОВ ИНТЕРПОЛЯЦИИ ПРИ МАСШТАБИРОВАНИИ ЦИФРОВЫХ АЭРОКОСМИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

© 2011 г. Ю. Г. Веселов*, А. С. Островский

ВУНЦ ВВС “Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина”, Москва

*E-mail: vesel_foto@mail.ru

Поступила в редакцию 25.10.2010 г.

Получены зависимости оценки разрешающей способности от типа интерполяции при масштабировании аэрокосмических изображений. Проведен подробный анализ эффективности применения различных алгоритмов интерполяции при масштабировании в ходе дешифрирования штриховых тест-объектов на цифровом изображении.

Ключевые слова: цифровые оптико-электронные системы дистанционного зондирования Земли, цифровые аэрокосмические изображения, разрешающая способность, интерполяция, масштабирование, штриховой тест-объект

ПРОБЛЕМА ОЦЕНКИ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РАЗЛИЧНЫХ АЛГОРИТМОВ ИНТЕРПОЛЯЦИИ ПРИ МАСШТАБИРОВАНИИ

Практически любой этап обработки цифрового изображения оказывает влияние на его качество. При дешифрировании цифровых аэрокосмических изображений штриховых тест-объектов с целью оценки его резкостных параметров часто используется процедура изменения масштаба. Так как разрешающая способность является одним из критериев ограничивающих условия применения аппаратуры наблюдения (например, международный Договор по Открытому небу), представляется интересной зависимость оценки разрешающей способности от типа используемого алгоритма интерполяции при масштабировании.

Основным методом оценки разрешающей способности оптико-электронных систем является визуальный метод. Для оценки разрешения оптико-электронных систем дистанционного зондирования (ДЗ) Земли применяются штриховые тест-объекты (рис. 1 – тестирование в лабораторных условиях, рис. 2 – тестирование в летных условиях). С целью обеспечения оптимальных условий наблюдений при визуальном дешифрировании используется изменение масштаба изображения.

При увеличении масштаба изображения каждая точка исходного изображения должна быть сопоставлена группе точек увеличенного изображения.

Для чего на первом этапе формируется вспомогательное изображение с разнесенными на расстояние согласно необходимому масштабу точками оригинального изображения, далее изображение дополняется точками, яркость которых определяется интерполирующей функцией. Качество масштабированного изображения определяется алгоритмами, используемыми для осуществления этих сопоставлений.

Для уменьшения масштаба группы точек исходного изображения должны быть сопоставлены отдельным точкам уменьшенного изображения.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ИЗОБРАЖЕНИЯ ПРИ МАСШТАБИРОВАНИИ

Для управления качеством изображения при масштабировании используют различные методы интерполяции, основными из которых являются метод “ближайшего соседа” (Nearest neighbor), билинейный (Bilinear) и бикубический (Bicubic) (рис. 3) (Красильников, 2001).

Самый простой, легко реализуемый и наименее ресурсоемкий из перечисленных выше – метод “ближайшего соседа”. При создании нового пиксела используется информация о ближайших точках оригинального изображения, т.е. сохраняются оригинальные значения пикселей без их усреднения, как в других методах (рис. 3а, б, рис. 4).

Однако такой метод определения яркости вставляемых в изображение пикселей не является наи-

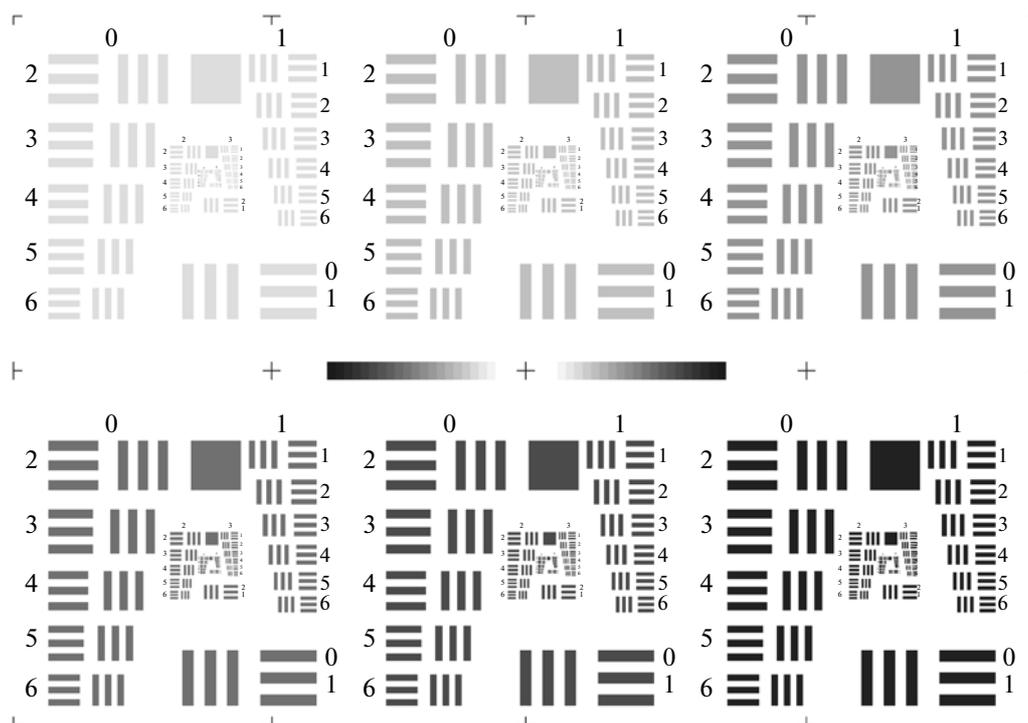


Рис. 1. Тест-объект для оценки пространственно-частотных характеристик оптико-электронных систем в лабораторных условиях.

лучшим, так как приводит к повышению заметности их растровой структуры, которая при больших увеличениях снижает качество воспроизводимых изображений (Красильников, 2001). При этом масштабировании (увеличении) наблюдается появление эффекта ступенчатости диагональных линий и кривых (пила). Кроме того, при использовании метода “ближайшего соседа” некоторые значения пикселей могут быть утеряны, а другие дублированы. Возможно возникновение разрывов узких линий на изображениях (дороги, реки и т.д.).

Метод “ближайшего соседа” используется, в основном, в геоинформационных системах (ГИС) обработки для масштабирования (трансформирования) тематических растровых изображений, значения пикселей которых являются качественными (обозначают тип растительности, влажность почв и пр.).

Билинейная интерполяция – в вычислительной математике (Корн, Корн, 1984; Математическая энциклопедия, 1977) – это расширение линейной интерполяции для функций в двух переменных. Ключевая идея заключается в том, чтобы провести обычную линейную интерполяцию сначала в одном направлении, затем в другом.

Понятие принципа билинейной интерполяции раскрывается простым примером.

Для интерполяции билинейным методом функции f в точке $P(x, y)$ необходимо знать значения функции в (окружающих) точках $Q_{11} = (x_1, y_1)$, $Q_{12} = (x_1, y_2)$, $Q_{21} = (x_2, y_1)$, $Q_{22} = (x_2, y_2)$ (рис. 5).

Первым шагом интерполируется (линейно) значение вспомогательных точек R_1 и R_2 вдоль оси абсцисс, где $R_1 = (x, y_1)$, $R_2 = (x, y_2)$

$$f(R_1) \approx \frac{x_2 - x}{x_2 - x_1} f(Q_{11}) + \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} f(Q_{21}),$$

$$f(R_2) \approx \frac{x_2 - x}{x_2 - x_1} f(Q_{12}) + \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} f(Q_{22}).$$

Далее проводится линейная интерполяция между вспомогательными точками R_1 и R_2 .

$$f(P) \approx \frac{y_2 - y}{y_2 - y_1} f(R_1) + \frac{y - y_1}{y_2 - y_1} f(R_2).$$

$f(P)$ является приближительным значением функции в точке P , т.е. $f(x, y)$.

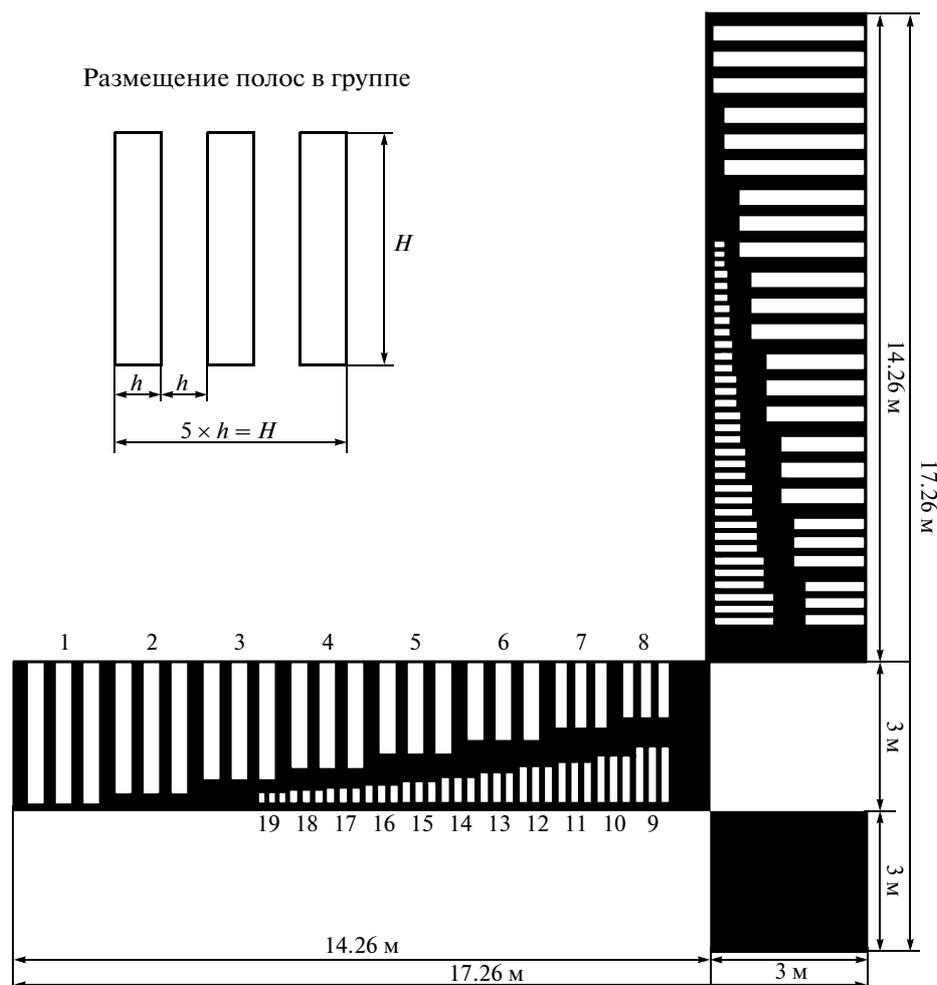


Рис. 2. Тест-объект для оценки пространственно-частотных характеристик оптико-электронных систем в летных условиях.

$$f(x, y) \approx \frac{f(Q_{11})}{(x_2 - x_1)(y_2 - y_1)}(x_2 - x)(y_2 - y) + \frac{f(Q_{21})}{(x_2 - x_1)(y_2 - y_1)}(x - x_1)(y_2 - y) + \frac{f(Q_{12})}{(x_2 - x_1)(y_2 - y_1)}(x_2 - x)(y - y_1) + \frac{f(Q_{22})}{(x_2 - x_1)(y_2 - y_1)}(x - x_1)(y - y_1).$$

Достаточно подробно принцип получения интерполированного изображения методом билинейной интерполяции представлен на рис. 6.

На первом этапе формируется вспомогательное изображение с разнесенными на расстояние согласно необходимому масштабу изображения точками (рис. 6б). Далее выполняется линейная интерполяция по столбцам (строкам) (рис. 6в). На конечном этапе формируется конечное интерполированное билинейным методом изображение (рис. 6г).

Бикубический метод интерполяции — дает наилучшие результаты при обработке фотоснимков, поскольку использует значения восьми прилегаю-

щих пикселей и добавляет эффект улучшения резкости за счет повышения контрастности переходов.

Бикубическая интерполяция — в вычислительной математике (Корн, Корн, 1984; Математическая энциклопедия, 1977) — это расширение кубической интерполяции на случай функции двух переменных, значения которой заданы на двумерной регулярной сетке. Поверхность, полученная в результате бикубической интерполяции, является гладкой функцией, в отличие от поверхностей, полученных в результате билинейной интерполяции или интерполяции методом “ближайшего соседа”. Также бикубическая интерполяция часто использу-

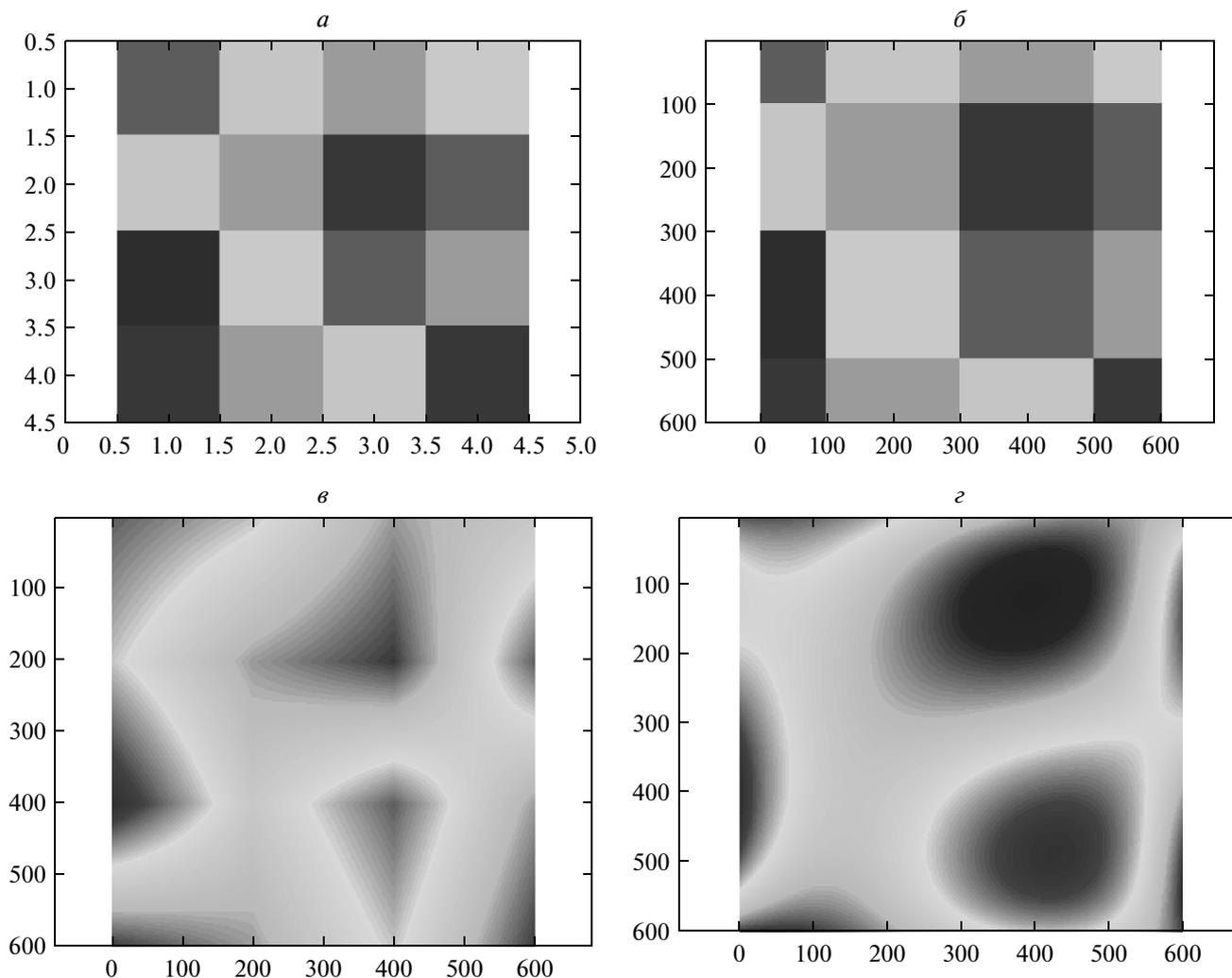


Рис. 3. К понятию интерполяции при масштабировании (увеличение в 150 раз): *а* – исходное изображение; *б* – интерполяция методом “ближайшего соседа”; *в* – билинейная интерполяция; *г* – бикубическая интерполяция.

ется в обработке изображений, давая более качественное изображение по сравнению с билинейной интерполяцией.

Рассматриваются два подхода к реализации бикубической интерполяции: бикубическая интерполяция сплайнами; последовательная кубическая интерполяция (Математическая энциклопедия, 1977).

При бикубической интерполяции сплайнами для интерполяции значения функции $f(x, y)$ в точке $P(x, y)$, лежащей внутри квадрата $[0, 1] \times [0, 1]$, при известном значении функции f в шестнадцати соседних точках (i, j) , $i = -1 \dots 2$, $j = -1 \dots 2$ общий вид функции, задающей интерполированную поверхность, может быть записан следующим образом:

$$p(x, y) = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 a_{ij} x^i y^j.$$

Для нахождения коэффициентов a_{ij} необходимо подставить в приведенное выше уравнение значения функции в известных шестнадцати точках.

Например:

$$f(-1, 0) = a_{00} - a_{10} + a_{20} - a_{30}$$

$$f(0, 0) = a_{00}$$

$$f(1, 0) = a_{00} + a_{10} + a_{20} + a_{30}$$

$$f(2, 0) = a_{00} + 2a_{10} + 4a_{20} + 8a_{30}.$$

Полностью в матричном виде

$$M\alpha^T = \gamma^T,$$

где

$$\alpha = [a_{00} a_{01} a_{02} a_{03} a_{10} a_{11} a_{12} a_{13} a_{20} a_{21} a_{22} a_{23} a_{30} a_{31} a_{32} a_{33}]$$

$$\gamma = [f(-1,-1) f(0,-1) f(1,-1) f(2,-1) f(-1,0) f(0,0) f(1,0) f(2,0) f(-1,1) f(0,1) f(1,1) f(2,1) f(-1,2) f(0,2) f(1,2) f(2,2)]$$

$$M = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & 1 & -1 & 1 & 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & 1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & 2 & -2 & 2 & -2 & 4 & -4 & 4 & -4 & 8 & -8 & 8 & -8 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 4 & 0 & 0 & 0 & 8 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 2 & 2 & 2 & 2 & 4 & 4 & 4 & 4 & 8 & 8 & 8 & 8 \\ 1 & 2 & 4 & 8 & -1 & -2 & -4 & -8 & 1 & 2 & 4 & 8 & -1 & -2 & -4 & -8 \\ 1 & 2 & 4 & 8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 4 & 8 & 1 & 2 & 4 & 8 & 1 & 2 & 4 & 8 & 1 & 2 & 4 & 8 \\ 1 & 2 & 4 & 8 & 2 & 4 & 8 & 16 & 4 & 8 & 16 & 32 & 8 & 16 & 32 & 64 \end{bmatrix}$$

Решая получившуюся систему линейных алгебраических уравнений, можно найти значения a_{ij} в явном виде:

$$\alpha^T = \frac{1}{36} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 36 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 12 & 0 & 0 & 0 & -18 & 0 & 0 & 0 & 36 & 0 & 0 & 0 & -6 & 0 & 0 \\ 0 & 18 & 0 & 0 & 0 & -36 & 0 & 0 & 0 & 18 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -6 & 0 & 0 & 0 & 18 & 0 & 0 & 0 & -18 & 0 & 0 & 0 & 6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -12 & -18 & 36 & -6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 4 & 6 & -12 & 2 & 6 & 9 & -18 & 3 & -12 & -18 & 36 & -6 & 2 & 3 & -6 & 1 \\ -6 & -9 & 18 & -3 & 12 & 18 & -36 & 6 & -6 & -9 & 18 & -3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 3 & -6 & 1 & -6 & -9 & 18 & -3 & 6 & 9 & -18 & 3 & -2 & -3 & 6 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 18 & -36 & 18 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -6 & 12 & -6 & 0 & -9 & 18 & -9 & 0 & 18 & -36 & 18 & 0 & -3 & 6 & -3 & 0 \\ 9 & -18 & 9 & 0 & -18 & 36 & -18 & 0 & 9 & -18 & 9 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -3 & 6 & -3 & 0 & 9 & -18 & 9 & 0 & -9 & 18 & -9 & 0 & 3 & -6 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -6 & 18 & -18 & 6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & -6 & 6 & -2 & 3 & -9 & 9 & -3 & -6 & 18 & -18 & 6 & 1 & -3 & 3 & -1 \\ -3 & 9 & -9 & 3 & 6 & -18 & 18 & -6 & -3 & 9 & -9 & 3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -3 & 3 & -1 & -3 & 9 & -9 & 3 & 3 & -9 & 9 & -3 & -1 & 3 & -3 & 1 \end{bmatrix} x^T.$$

Единожды найденные коэффициенты a_{ij} теперь могут быть использованы для многократного вычисления интерполированного значения функции в произвольных точках квадрата $[0, 1] \times [0, 1]$.

С другой стороны, последовательная интерполяция заключается в том, что для нахождения интерполированного значения можно сначала произвести кубическую интерполяцию в одном направлении, а затем в другом.

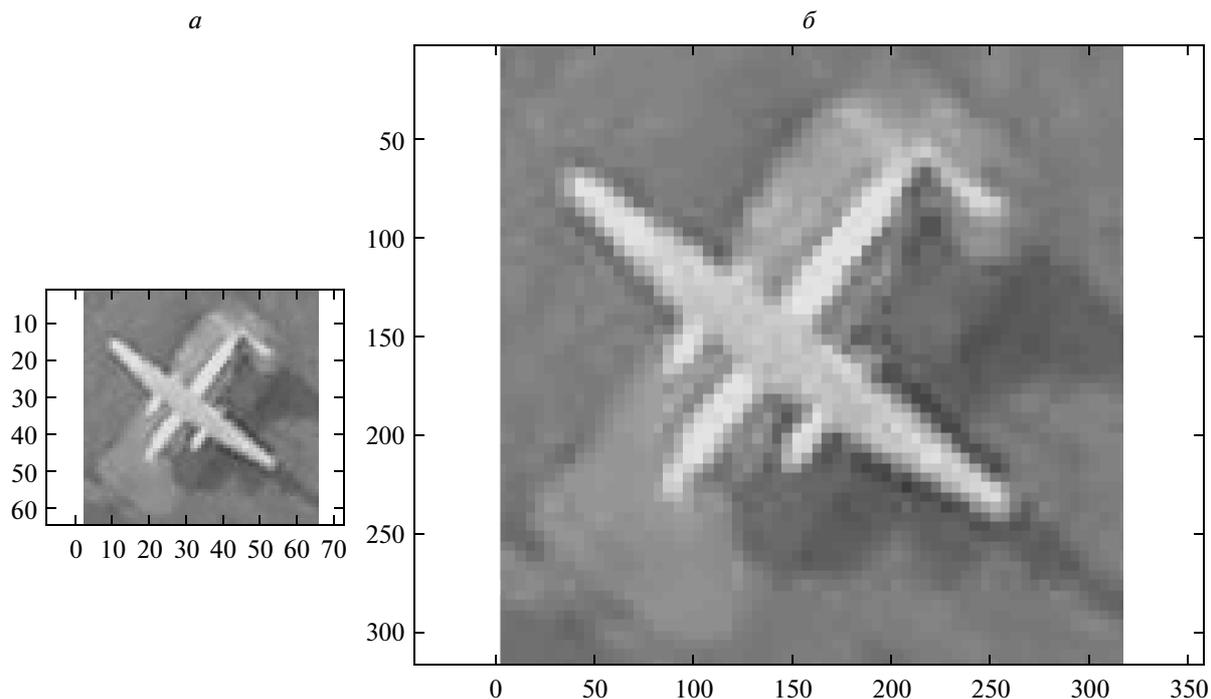


Рис. 4. К понятию интерполяции методом “ближайшего соседа” (увеличение в 5 раз): *a* – исходное изображение; *б* – интерполяция по методу “ближайшего соседа”.

Для функции $f(x)$ с известными значениями $f(-1), f(0), f(1), f(2)$ можно построить кубический сплайн: $p(x) = \sum_{i=0}^3 b_i x^i$, или в матричном виде

$$p(x) = \begin{bmatrix} 1 & x & x^2 & x^3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} f(-1) \\ f(0) \\ f(1) \\ f(2) \end{bmatrix}, \quad A = \frac{1}{6} \begin{bmatrix} 0 & 6 & 0 & 0 \\ -2 & -3 & 6 & -1 \\ 3 & -6 & 3 & 0 \\ -1 & 3 & -3 & 1 \end{bmatrix}.$$

Таким образом, для нахождения интерполированного значения $p(x,y)$ в квадрате $[0.1] \times [0.1]$ можно сначала рассчитать четыре значения $p(x,-1), p(x,0), p(x,1), p(x,2)$ для зафиксированного x , затем через полученные четыре точки построить кубический сплайн, и этим завершить вычисление $p(x,y)$.

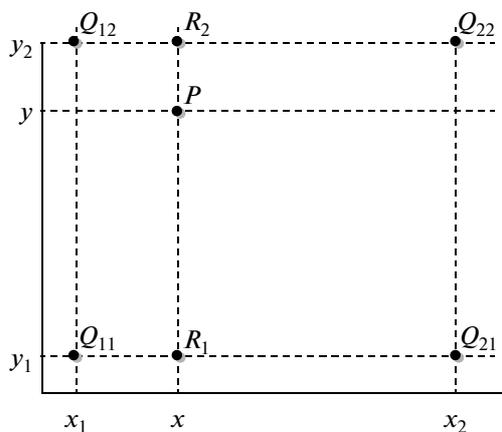


Рис. 5. К понятию билинейной интерполяции.

$$p(x,y) = \begin{bmatrix} 1 & y & y^2 & y^3 \end{bmatrix} A \left(\begin{bmatrix} 1 & x & x^2 & x^3 \end{bmatrix} A \times \begin{bmatrix} f(-1,-1) & f(0,-1) & f(1,-1) & f(2,-1) \\ f(-1,0) & f(0,0) & f(1,0) & f(2,0) \\ f(-1,1) & f(0,1) & f(1,1) & f(2,1) \\ f(-1,2) & f(0,2) & f(1,2) & f(2,2) \end{bmatrix} \right)^T =$$

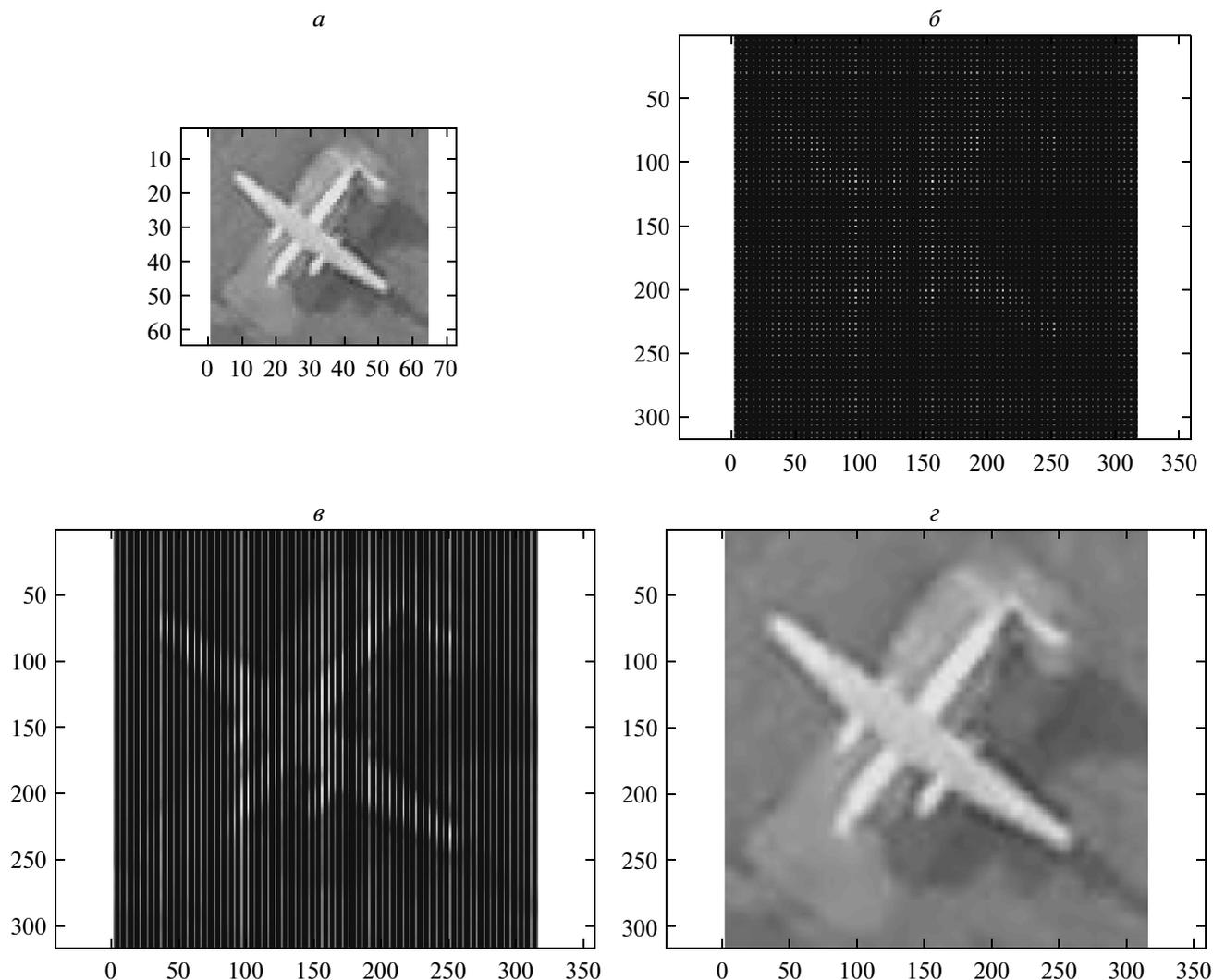


Рис. 6. К понятию билинейной интерполяции (увеличение в 5 раз): *a* – исходное изображение; *б* – вспомогательное изображение; *в* – линейная интерполяция по столбцам; *г* – билинейная интерполяция.

$$\begin{aligned}
 &= \begin{bmatrix} 1 & y & y^2 & y^3 \end{bmatrix} A \times \\
 &\times \begin{bmatrix} f(-1,-1) & f(0,-1) & f(1,-1) & f(2,-1) \\ f(-1,0) & f(0,0) & f(1,0) & f(2,0) \\ f(-1,1) & f(0,1) & f(1,1) & f(2,1) \\ f(-1,2) & f(0,2) & f(1,2) & f(2,2) \end{bmatrix} A^T \begin{bmatrix} 1 \\ x \\ x^2 \\ x^3 \end{bmatrix}.
 \end{aligned}$$

Подробно принцип получения интерполированного изображения методом бикубической интерполяции представлен на рис. 7.

На первом этапе формируется вспомогательное изображение с разнесенными на расстояние согласно необходимому масштабу изображения точками (рис. 7б). Далее выполняется линейная интерполяция в одном направлении – по столбцам (рис. 7в). На следующем этапе выполняется кубическая интерпо-

ляция в другом направлении – формируется конечное интерполированное бикубическим методом изображение (рис. 7г).

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЛЕТНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ДЛЯ ОЦЕНКИ ЗАВИСИМОСТИ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ОТ ВИДА ИНТЕРПОЛЯЦИИ ПРИ МАСШТАБИРОВАНИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Процесс эффективности интерполяции при масштабировании можно наглядно (качественно) оценить по одномерному срезу интерполированного различными методами изображения (рис. 8, 9).

Из представленных выше иллюстраций видны особенности трансформирования исходного изоб-

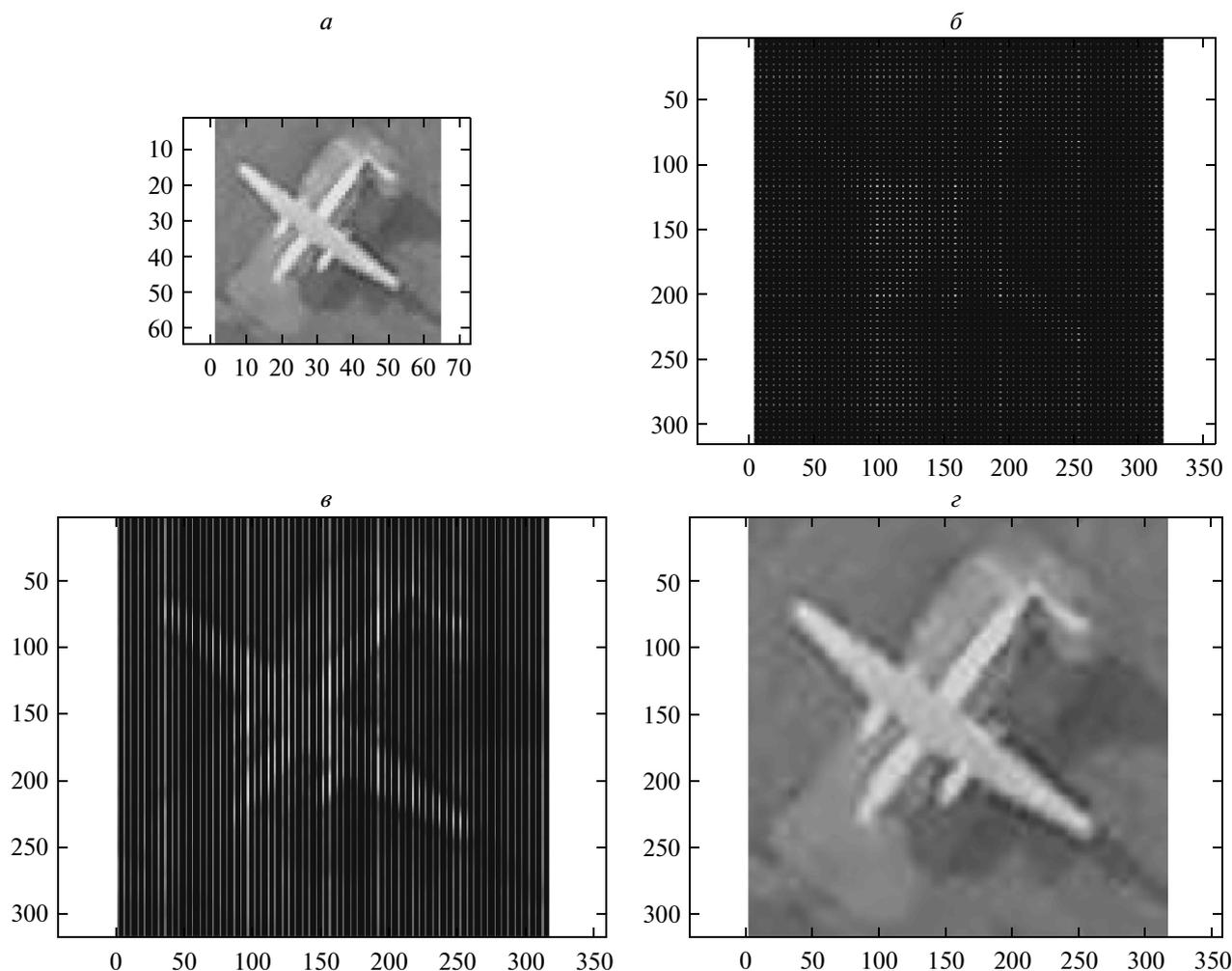


Рис. 7. К понятию бикубической интерполяции (увеличение в 5 раз): *a* – исходное изображение; *б* – вспомогательное изображение; *в* – кубическая интерполяция по столбцам; *г* – бикубическая интерполяция.

ражения при использовании различных методов интерполяции при масштабировании.

Для количественного исследования эффективности методов интерполяции изображений при масштабировании использовались изображения штриховых тест-объектов (рис. 10), полученные в летных условиях. В эксперименте использовались три типа мир: двухштриховая разнесенная мира *G* (темно-серые штрихи на светло-сером поле), традиционная трехштриховая мира *R1* (светло-серые штрихи на темно-сером поле), трехштриховая разнесенная мира *R3* (светло-серые штрихи на темно-сером поле, три штриха между соседними группами полос). Съемка выполнялась с четырех высот (250 м, 300 м, 350 м, 400 м) с беспилотного летательного аппарата (БЛА) с использованием цифровой аэрофотосъемочной системы с реализованной схемой Байера (RGBG), фокусным расстоянием 180×10^{-3} м, от-

носительным входным отверстием объектива 1 : 2.8 и линейным размером пиксела 3.275×10^{-6} м.

Дешифрированию подвергались цветные и черно-белые изображения с использованием при масштабировании интерполяции методом “ближайшего соседа”, билинейным и бикубическим методами. Причем используемые для дешифрирования черно-белые изображения были получены из цветных с помощью стандартных, встроенных в известные редакторы, изображений типа Photoshop и ACDSee, алгоритмов (grayscale) (Мак-Клелланд, Фуллер, 2006) (рис. 11).

Для дешифрирования выбирались кадры, содержащие полные изображения всех указанных трех мир. Для статистического анализа полученных результатов использовались данные съемки не менее пяти проходов над мирами на каждой высоте. При дешифрировании изображений применялось пра-

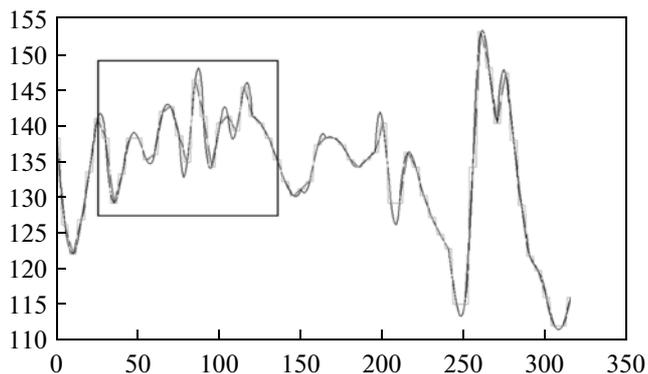


Рис. 8. Одномерный срез по яркости (в уровнях серого тона) интерполированного различными методами изображения самолета представленного на изображениях выше.

вило – “Последняя разрешаемая группа мира. Необходимо разрешение всех триад, чтобы считать группу разрешенной”.

К визуальному анализу были привлечены десять дешифровщиков.

В работе все зависимости построены с использованием значений ожидаемой минимальной высоты $H_{\min\text{-expected}}$.

$H_{\min\text{-expected}}$ рассчитывается посредством усреднения значений $H_{\min\text{-calculated}}$.

Значение $H_{\min\text{-calculated}}$ определяется по формуле:

$$H_{\min\text{-calculated}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n H_{\min i}$$

$H_{\min i}$ – минимальная высота над уровнем земли, на которой конфигурация цифровой оптико-электронной системы, установленной на БЛА, может эксплуатироваться в ходе наблюдательного полета и разрешение на местности которой не лучше чем 30 см.

$$H_{\min i} = H_i \frac{L_a}{L_i},$$

где H_i – высота над проверочной мирой ЛА в метрах в момент съемки изображения проверочной миры; L_i – разрешение на местности; $L_a = 30$ см.

По результатам проведенных исследований получены зависимости (рис. 12–19) значения $H_{\min\text{-expected}}$ (далее по тексту будет употребляться просто как H_{\min}) от использованного метода интер-

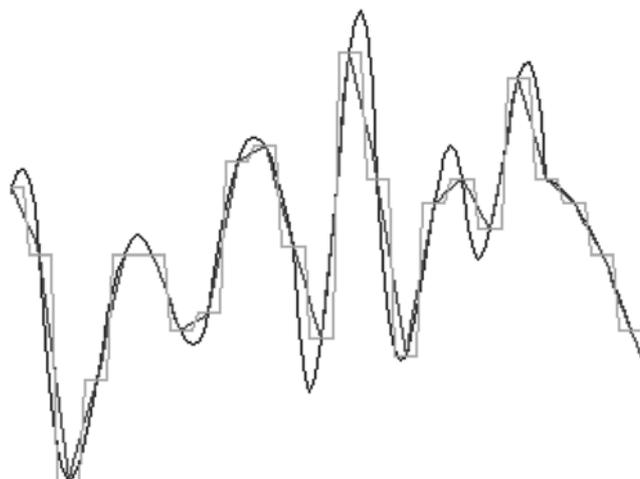


Рис. 9. Локальный участок кривых из рис. 6 (зеленая линия – метод “ближайшего соседа”, красная линия – билинейный метод, синяя линия – бикубический метод).

поляции при масштабировании (метод “ближайшего соседа”), билинейный и бикубический методы для различных типов мир.

Оценка разрешающей способности и, следовательно, H_{\min} , полученная при визуальном дешифрировании с применением различных методов интерполяции при масштабировании, имеет максимальное значение при использовании бикубической интерполяции и минимальное значение при использовании интерполяции методом “ближайшего соседа” (рис. 12–17). Различие между H_{\min} , полученных

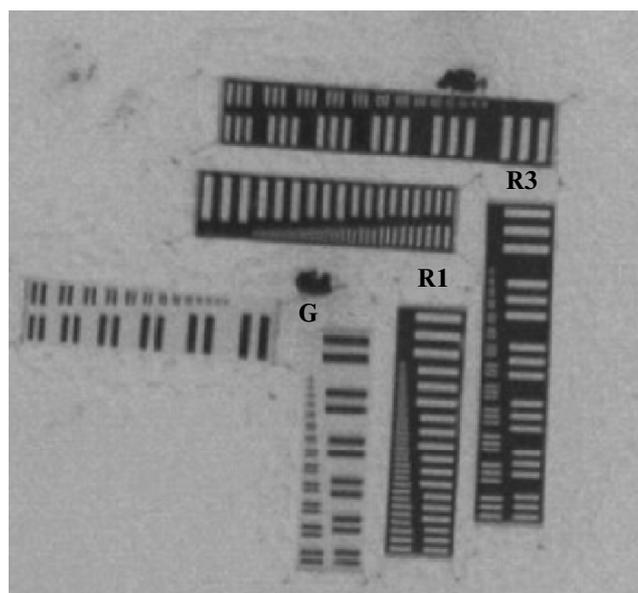


Рис. 10. Изображение тестового полигона.

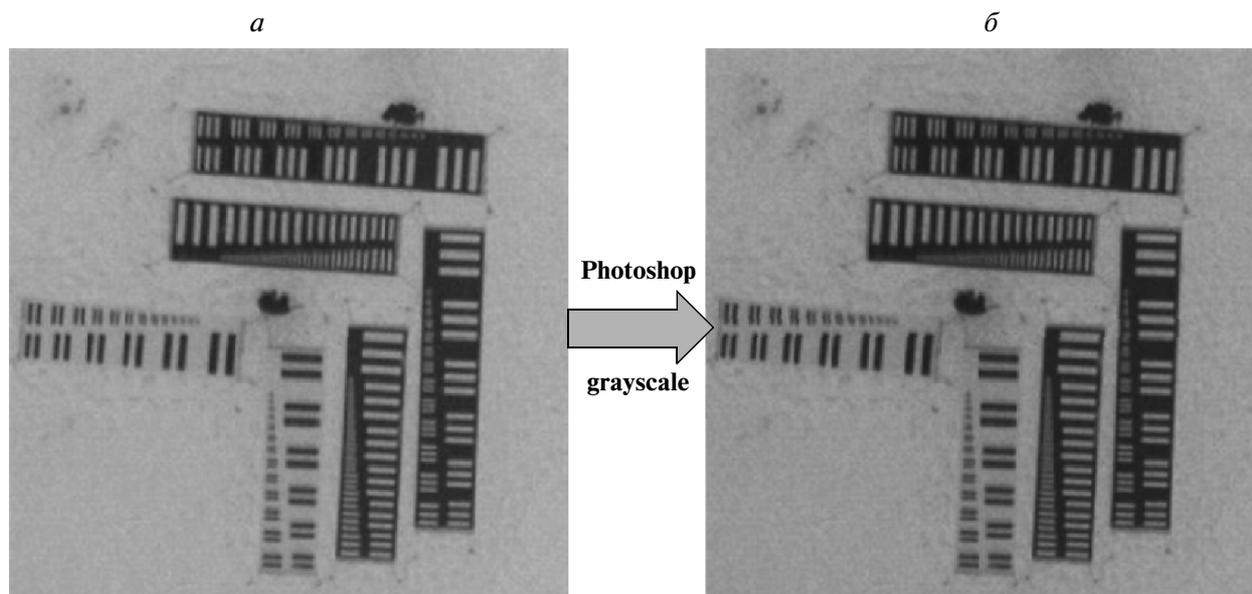


Рис. 11. Перевод цветного изображения в черно-белое: *a* – исходное цветное изображение; *б* – черно-белое изображение.

при использовании методов “ближайшего соседа” и бикубической интерполяции для цветного изображения, составляет 6%, для черно-белого – 9% (в пользу бикубической интерполяции), а при использовании методов “ближайшего соседа” и билинейной интерполяции для цветного изображения – 4%, черно-белого – 5% (в пользу билинейной интерполяции) (табл. 1).

Причем среднее арифметическое значение оценок среднеквадратического отклонения (СКО) H_{\min} в процентах относительно среднего арифметического значений H_{\min} составило $\bar{\sigma}_{H_{\min}} \approx 6\%$ (табл. 2).

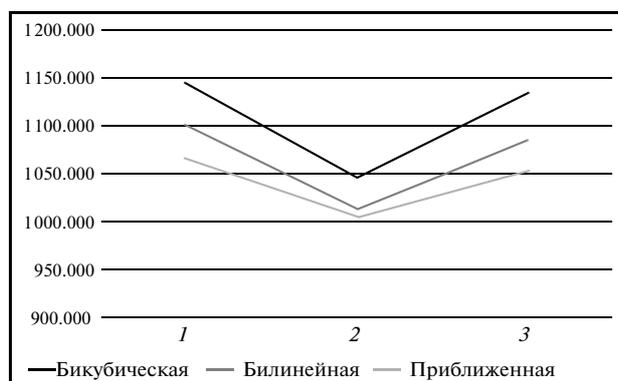


Рис. 12. Значения H_{\min} при визуальном анализе цветного изображения тремя методами интерполяции для трех типов мир 1 – G, 2 – R1, 3 – R3.

Проведенные исследования (рис. 8, 9) показали, что бикубическая интерполяция вносит некоторые изменения в пространственно-частотную структуру сгенерированного изображения, хотя прирост разрешения, как уже было сказано, не превосходит 10%. По этой причине, наиболее “прозрачным” выглядит алгоритм интерполяции при масштабировании “ближайший сосед”. Хотя на практике при дешифрировании цифровых изображений реальных объектов опытные дешифровщики при масштабировании пользуются бикубическим методом.

Анализ приведенных выше данных позволяет сделать вывод, что изменение значения оценки H_{\min} при визуальном анализе изображения с использованием различных алгоритмов интерполяции при масштабировании соизмеримо со среднеарифметическим значением оценки СКО H_{\min} в процентах относительно среднего арифметического \bar{H}_{\min} . Этот факт говорит о незначительном изменении значения оценки разрешающей способности, а следовательно и H_{\min} при использовании при визуальном анализе изображений штриховых тест-объектов различных алгоритмов интерполяции при масштабировании.

Подробно анализируя зависимости H_{\min} от цвета изображения и типа используемой миры при различных методах интерполяции, представленные на рис. 17, можно увидеть, к примеру, что, для черно-белого изображения разброс между значениями H_{\min} , оцененными с использованием методов “ближайшего соседа” и бикубической интерполяции,

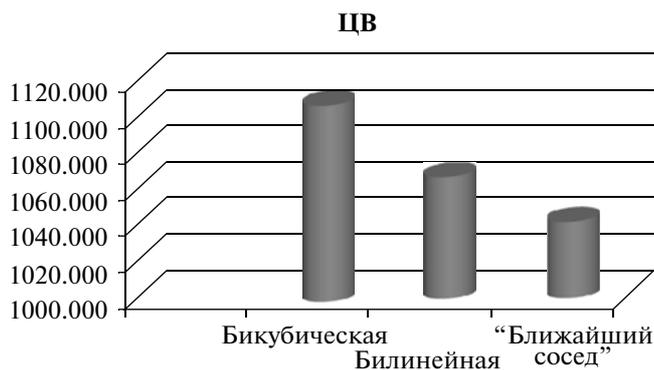


Рис. 13. Зависимость H_{min} от применяемого метода интерполяции при визуальном анализе цветного изображения.

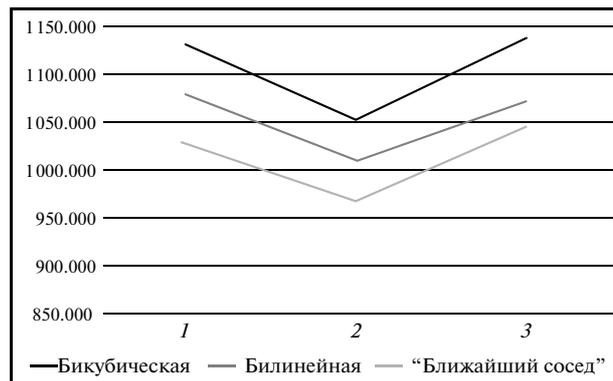


Рис. 14. Значения H_{min} при визуальном анализе черно-белого изображения тремя методами интерполяции для трех типов мир 1 – G, 2 – R1, 3 – R3.

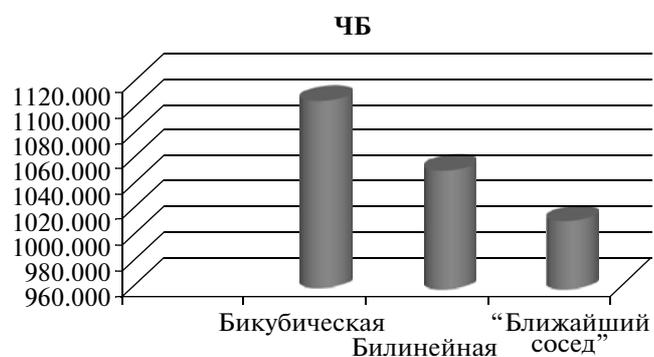


Рис. 15. Зависимость H_{min} от применяемого метода интерполяции при визуальном анализе черно-белого изображения.

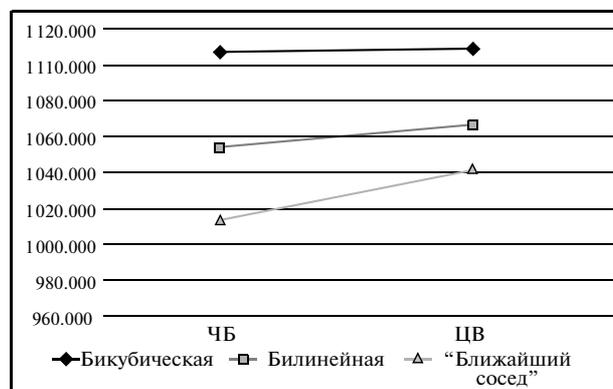


Рис. 16. Зависимость H_{min} от цвета изображения при различных методах интерполяции.

больше на 2.5%, чем для цветного изображения. Аналогичное соотношение можно наблюдать и при сравнении методов “ближайшего соседа” – билинейная интерполяция, где разброс незначителен и составляет 1% (табл. 3–6).

В целом значения H_{min} , полученные по цветным изображениям, на 1.3% выше, чем по черно-белым (преобразованным из цветных) рис. 18.

Из сказанного выше следует, что перевод цветного изображения в черно-белое не обеспечивает увеличения оценки разрешающей способности.

Анализ зависимости H_{min} от типа используемого тест-объекта (рис. 19) показывает, что более высокое значение оценки разрешающей способности было получено при использовании двухштриховой разнесенной миры (G) (темно-серые штрихи на

светло-сером поле) и трехштриховой разнесенной миры (R3) (светло-серые штрихи на темно-сером поле, три штриха между соседними группами полос) по сравнению с трехштриховой традиционной миры (R1).

Цифровые изображения, использованные для представленного исследования, получены с помощью цифровой аэрофотосъемочной системы с ПЗС-приемником излучения (ПЗС – прибор с рядовой связью).

В ходе проведения исследований эффективности оценки разрешающей способности цифровых оптико-электронных систем при использовании различных алгоритмов интерполяции при масштабировании оценка разрешающей способности осуществлялась, в том числе и отдельно в каждом канале (r, g, b). Особенности изменения разрешающей

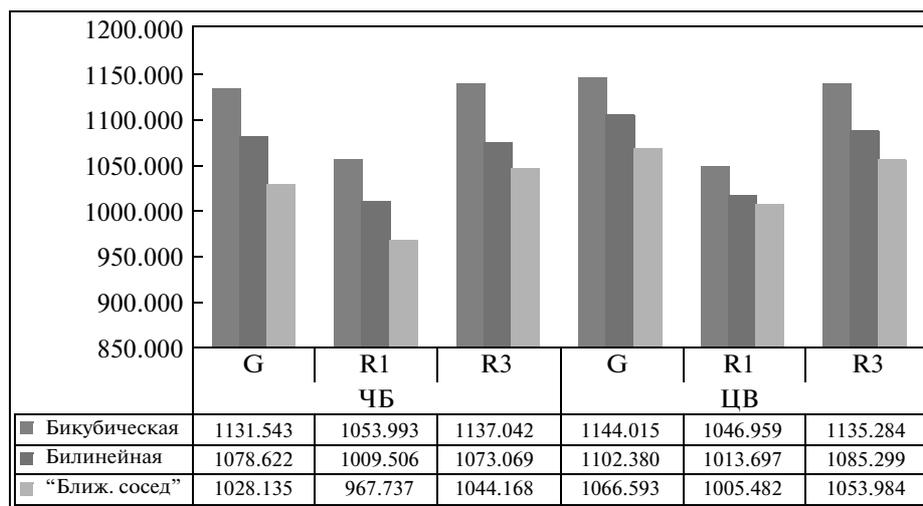


Рис. 17. Зависимость H_{\min} от цвета изображения и типа используемой миры при различных методах интерполяции.

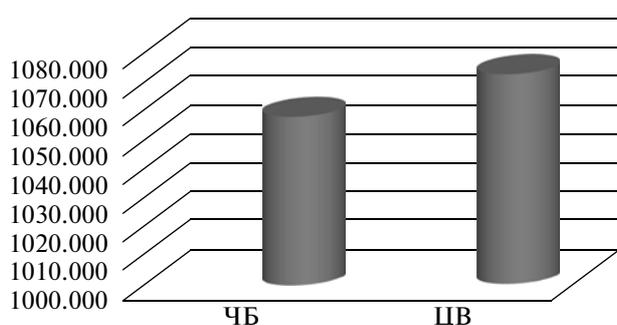


Рис. 18. Зависимость H_{\min} от цвета изображения.

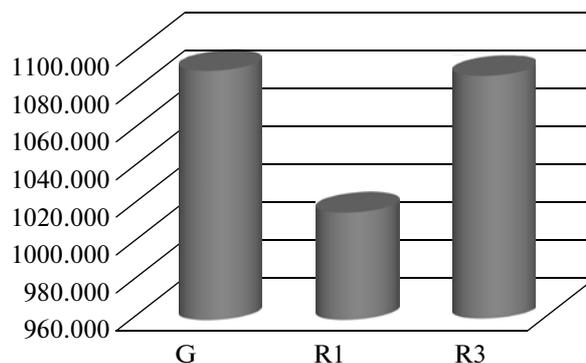


Рис. 19. Зависимость H_{\min} от типа используемого тест-объекта.

способности при использовании различных алгоритмов интерполяции при масштабировании близки (с точностью $\approx 2\%$) к результатам, полученным по конечному цветному изображению.

Также проводились аналогичные исследования с использованием цифровых аэрофотоснимков, полученных с использованием цифровой аэрофото-съемочной системы с КМОП-приемником излучения (КМОП – комплементарный металло-оксид-

ный полупроводник). Полученные результаты аналогичны тем, которые представлены выше.

В настоящее время приобретают все большую популярность гиперспектральные системы ДЗ местности. При дешифрировании изображений гиперспектральной системы рассматриваемые процедуры можно применять как в каждом канале, так и в едином изображении без всяких изменений.

Таблица 1. Различия между оценками значений H_{\min} , полученных при визуальном анализе изображений с использованием различных методов интерполяции при масштабировании

Тип интерполяции	Черно-белое изображение	Цветное изображение
“Ближайший сосед” – Бикубическая	8.5%	5.9%
“Ближайший сосед” – Билинейная	4.8%	3.7%

Таблица 2. Оценки СКО значений H_{\min} в процентах относительно среднего арифметического значения H_{\min} для каждого типа мира и цвета изображения

Тип интерполяции	Оценка СКО H_{\min} в % относительно среднего арифметического H_{\min}						Среднее арифметическое значение
	Черно-белое изображение			Цветное изображение			
	G	$R1$	$R3$	G	$R1$	$R3$	
Бикубическая	6.657	5.971	6.081	6.534	5.279	5.939	6.077
Билинейная	6.805	5.264	5.071	6.356	4.984	5.737	5.703
Ближайший сосед	6.431	4.588	4.945	6.841	5.474	5.211	5.582
Среднее арифметическое значение	6.631	5.275	5.366	6.577	5.246	5.629	5.787

Таблица 3. Зависимость H_{\min} от цвета изображения и типа используемой мира при различных методах интерполяции (черно-белое изображение)

Тип интерполяции	H_{\min} , М		
	G	$R1$	$R3$
Бикубическая	1131.543	1053.993	1137.042
Билинейная	1078.622	1009.506	1073.069
“Ближайший сосед”	1028.135	967.737	1044.168

Таблица 4. Сравнительная оценка значений H_{\min} определенных при использовании различных методов интерполяции (черно-белое изображение)

Тип интерполяции	Разница между значениями H_{\min} , %			Среднее значение, %
	G	$R1$	$R3$	
“Ближайший сосед” – Бикубическая	9.139	8.184	8.168	8.497
“Ближайший сосед” – Билинейная	4.677	4.221	5.626	4.841

Таблица 5. Зависимость H_{\min} от цвета изображения и типа используемой мира при различных методах интерполяции (цветное изображение)

Тип интерполяции	H_{\min} , М		
	G	$R1$	$R3$
Бикубическая	1144.015	1046.959	1135.284
Билинейная	1102.380	1013.697	1085.299
“Ближайший сосед”	1066.593	1005.482	1053.984

Таблица 6. Сравнительная оценка значений H_{\min} определенных при использовании различных методов интерполяции (цветное изображение)

Тип интерполяции	Разница между значениями H_{\min} , %			Среднее значение, %
	G	$R1$	$R3$	
“Ближайший сосед” – Бикубическая	6.768	3.962	7.161	5.963
“Ближайший сосед” – Билинейная	3.639	3.177	4.403	3.740

Полученные в работе результаты помогут создать подробные методики оценки качества цифровых изображений, полученных современными цифровыми аэрокосмическими оптико-электронными системами ДЗ Земли, а также оценить технические характеристики последних с использованием различных типов штриховых тестовых полигонов.

Работа поддержана РФФИ, проект 08-08-00613.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Красильников Н.Н.* Цифровая обработка изображений. М.: Вузовская книга, 2001.
- Корн Г., Корн Т.* Справочник по математике. М.: Главная редакция физико-математической литературы, 1984.
- Математическая энциклопедия / Под ред. И.М. Виноградова. М.: Сов. энциклопедия, 1977.
- Мак-Келланд Д., Фуллер Л.У.* Photoshop CS2. Библия пользователя: Пер. с англ. М.: ООО И.Д. Вильямс, 2006.

To the Definition of Dependence of Estimation of Resolution on Algorithm of Interpolation at Scaling of Digital Images During their Visual Interpretation

Yu. G. Veselov, A. S. Ostrovskiy

N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin Military Air Force Academy, Moscow

The dependence of estimation of resolution on the type of interpolation at scaling is obtained. The application effectiveness of the different algorithms of interpolation at scaling during interpolation of digital images of test bars is in details analyzed.

Keywords: digital cameras, resolution, interpolation, scaling, test bar