

Быстрое КДФ и меры улучшения качества цветных изображений

Тигран Манукян, Акоп Саруханян

Институт проблем информатики и автоматизации НАН РА

tigran@manukyan.am, hakop@ipia.sci.am

Аннотация

В работе предложены метод улучшения качества цветного изображения и меры качества основанный на быстром Кватернионном Преобразовании Фурье (КДФ). Приведены также примеры улучшения цветных изображений.

1. Введение

В последние несколько десятков лет интенсивно исследуются и разрабатываются различные методы обработки и анализа цифровых изображений. Интенсивно используются спектральные методы обработки и анализа цифровых изображений основанные на ортогональных преобразованиях Фурье, Адамара, синусоидальных и вейвлет преобразованиях [1-4]. Одной из актуальных задач обработки цифровых изображений является задача улучшения их качества. Всевозможные методы улучшения качества изображения преследуют одну главную цель - повысить некоторые характеристики изображения с целью улучшения исходного изображения. Существует множество методов обработки полутоновых изображений, чего нельзя сказать о цветных изображениях. Целью настоящей работы является разработка метода улучшения качества цветных изображений, основанного на КДФ.

Способы улучшения качества полутоновых изображений можно разделить на две основные области: улучшение в пространственной области и улучшение в спектральной области.

Техника улучшения в пространственной области основана на методе выравнивания гистограмм и в основном оперирует яркостными компонентами изображения. Но при выравнивании гистограмм, в результате общей обработки часто теряются или очень сильно искажаются локальные детали изображения.

Методы улучшения качества в спектральной области включают преобразование яркостных компонентов изображения в частотную область, используя в частности косинусное, Фурье, Адамара и другие дискретные преобразования.

Эти два метода имеют свои достоинства и недостатки, допускающие их разные применения на цифровых изображениях. Основные недостатки указанных методов состоят в следующем. а) они вносят искажение в изображение; б) они не в состоянии улучшить все части изображения одинаково хорошо; в) очень трудно автоматизировать методы улучшения качества изображения.

Возникает естественный вопрос: возможно ли применять существующие методы улучшения качества полутоновых изображений для цветных изображений или же необходимо разработать новый метод?

Отметим, что основная проблема улучшения цифрового изображения заключается в определении подходящей меры измерения качества улучшенного изображения. Эта проблема становится более актуальной, когда улучшающий качество алгоритм параметричен. В этом случае возникают задачи определения наилучших параметров и наилучшего преобразования среди множества ортогональных преобразований, а также автоматизации процесса улучшения качества изображения.

Для достижения улучшения полутоновых изображений параметры модификации спектральных компонент преобразования Фурье выбираются так, чтобы функция меры качества полутоновых изображений [8], [9] достигала своего первого правостороннего экстремума (минимума или максимума, в зависимости от выбора функции). По существу возникают следующие вопросы.

Возможно ли использовать меры качества полутоновых изображений для цветных изображений или необходимо их модифицировать?

Возможно ли достичь улучшения качества цветных изображений при первых правосторонних локальных экстремумах функции мер, или же необходимо исследовать все точки экстремума?

В настоящей работе исследуются приведенные выше задачи. Предложен метод улучшения качества цветного изображения, основанный на быстром КПФ, а также функции меры качества цветных изображений. Приведены примеры улучшения цветных изображений.

2. Быстрое кватернионное преобразование Фурье

Кватернион определяется как гиперкомплексное число, $\mu = a + bi + cj + dk$, где a , b , c и d — действительные числа, a, i, j, k удовлетворяют следующим условиям:

$$i^2 = j^2 = k^2 = -1,$$

$$ij = k, \quad ji = -k, \quad jk = i, \quad kj = -i, \quad ki = j, \quad ik = -j.$$

Одномерное N -точечное ($N = 2^n$) кватернионное преобразование Фурье (КПФ) кватернионного вектора $f = (f[0], f[1], \dots, f[N-1])$ определяется формулой вида:

$$F[m] = \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-\mu \frac{2\pi}{N} mn) f[n], \quad m = 0, 1, \dots, N-1, \quad (1)$$

где μ — чисто единичный кватернион, т.е. $a=0$ и $b^2 + c^2 + d^2 = 1$, а экспонента определяется формулой:

$$\exp(-\mu \frac{2\pi}{N}) = \cos(\frac{2\pi}{N}) - \mu \sin(\frac{2\pi}{N}).$$

Введем обозначение $Q_N^m = \exp(-\mu \frac{2\pi}{N} m)$. Можно показать, что имеют место следующие соотношения:

$$\begin{aligned} Q_N^{m+N} &= Q_N^m, & Q_N^m &= Q_{N/4}^m, \\ Q_N^{m+N/2} &= -Q_N^m, & Q_N^{m+N/4} &= -\mu Q_N^m, \\ Q_N^{N/2} &= -1, & Q_N^{m+m} &= Q_N^m Q_N^m. \end{aligned} \quad (2)$$

Представим (1) в следующем виде:

$$\begin{aligned} F[m] &= \sum_{n=0}^{N/2-1} \exp(-\mu \frac{2\pi}{N} mn) f[n] + \sum_{n=N/2}^{N-1} \exp(-\mu \frac{2\pi}{N} mn) f[n] \\ &= \sum_{n=0}^{N/2-1} \exp(-\mu \frac{2\pi}{N} mn) f[n] + \sum_{n=0}^{N/2-1} \exp(-\mu \frac{2\pi}{N} m(n + N/2)) f[n + N/2]. \end{aligned} \quad (3)$$

Используя соотношения (2), находим,

$$\exp(-\mu \frac{2\pi}{N} m(n + \frac{N}{2})) = (-1)^m \exp(-\mu \frac{2\pi}{N} mn).$$

Следовательно, формулу (3) можно переписать в следующем виде:

$$F[m] = \sum_{n=0}^{N/2-1} \exp(-\mu \frac{2\pi}{N} mn) [f[n] + (-1)^m f[n + \frac{N}{2}]], \quad m = 0, 1, \dots, N-1. \quad (4)$$

Введем обозначения:

$$f_1[n] = f[n] + f[n + \frac{N}{2}], \quad (5)$$

$$f_2[n] = \exp(-\mu \frac{2\pi}{N} n) (f[n] - f[n + \frac{N}{2}]), \quad n = 0, 1, \dots, \frac{N}{2}-1.$$

Учитывая обозначения из формулы (4) находим, что:

$$F[2m] = \sum_{n=0}^{N/2-1} \exp(-\mu \frac{2\pi}{N} mn) f_1[n], \quad m = 0, 1, \dots, \frac{N}{2}-1, \quad (6)$$

$$F[2m+1] = \sum_{n=0}^{N/2-1} \exp(-\mu \frac{2\pi}{N} mn) f_2[n], \quad m = 0, 1, \dots, \frac{N}{2}-1.$$

Таким образом, для выполнения N -точечного КПФ вектора f достаточно формировать два вектора f_1 и f_2 (см. (5)), и с ними произвести два $N/2$ -точечных КПФ. Очевидно, что описанную процедуру можно произвести с формулами из (6), до 2-х точечных КПФ. Нетрудно показать, что описанный выше алгоритм требует соответственно $N \log_2 N$ и $\frac{N}{2} \log_2 N$ операций кватернионного сложения и умножения, или же $10N \log_2 N$ и $8N \log_2 N$ операций сложения и умножения действительных чисел.

Описанная процедура вывода быстрого алгоритма позволяет представить кватернионную матрицу Фурье $F_N = \{\exp(-\mu \frac{2\pi}{N} mn)\}_{m,n=0}^{N-1}$ в виде произведения слабозаполненных матриц

$$F_N = P_N B_n A_{n-1} B_{n-1} \dots A_2 B_2 A_1 B_1, \quad (7)$$

где P_N - побитно-обратимая (bit-reversal) перестановочная матрица, и

$$A_r = \text{diag} \left\{ \underbrace{1, 1, \dots, 1}_{2^{n-r}}, \underbrace{Q_{2^{n-r}+1}^0, \dots, Q_{2^{n-r}+1}^{2^{n-r}-1}}_{2^{n-r}}, \dots, \underbrace{1, 1, \dots, 1}_{2^{n-r}}, \underbrace{Q_{2^{n-r}+1}^0, \dots, Q_{2^{n-r}+1}^{2^{n-r}-1}}_{2^{n-r}} \right\}, \quad r = \overline{1, n-1}.$$

$$B_r = \text{diag} \left\{ \underbrace{\begin{pmatrix} I_{2^{n-r}} & I_{2^{n-r}} \\ I_{2^{n-r}} & -I_{2^{n-r}} \end{pmatrix}}_{2^{n-r}}, \dots, \underbrace{\begin{pmatrix} I_{2^{n-r}} & I_{2^{n-r}} \\ I_{2^{n-r}} & -I_{2^{n-r}} \end{pmatrix}}_{2^{n-r}} \right\}, \quad r = \overline{1, n}.$$

Заметим, что B_r и P_N - симметричные матрицы, т.е. $B_r^T = B_r$, $P_N^T = P_N$, где T - знак транспонирования. Факторизация обратной кватернионной матрицы Фурье следует из (7) и имеет следующий вид:

$$F_N^{-1} = \frac{1}{N} B_1 A_1^* B_2^* A_2^* \dots B_{n-1} A_{n-1}^* B_n P_N,$$

где C^* - кватернионно-сопряженная к матрице C .

Например, факторизация кватернионной матрицы Фурье 8-го порядка имеет вид $F_8 = P_8 B_3 A_2 B_2 A_1 B_1$, где

$$P_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_1 = \text{diag}\{1, 1, 1, 1, Q_3^0, Q_3^1, Q_3^2, Q_3^3\}$$

$$A_2 = \text{diag}\{1, 1, Q_4^0, Q_4^1, 1, 1, Q_4^2, Q_4^3\}$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} I_4 & I_4 \\ I_4 & -I_4 \end{bmatrix}, B_2 = \text{diag}\left\{ \begin{bmatrix} I_2 & I_2 \\ I_2 & -I_2 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} I_2 & I_2 \\ I_2 & -I_2 \end{bmatrix} \right\}, B_3 = \text{diag}\left\{ \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \right\},$$

$$Q_3^0 = \frac{\sqrt{2}}{2}(1-\mu), Q_3^1 = Q_3^2 = -\mu, Q_3^3 = -\frac{\sqrt{2}}{2}(1+\mu).$$

Двумерное ДКПФ над кватернионной матрицей определяется формулой вида

$$F[p, s] = \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-\mu \frac{2\pi}{N} pm) f[m, n] \exp(-\mu \frac{2\pi}{N} sn), \quad p, s = \overline{0, N-1}. \quad (8)$$

3. Метод улучшения цветных изображений

Улучшение качества однотонных изображений осуществляется в три этапа: 1) определяется спектр изображения относительно некоторого ортогонального преобразования (Фурье, Адамара, и т.д.); 2) осуществляется модификация спектральных компонент; 3) применяется обратное ортогональное преобразование [5].

Улучшение цветных изображений производится в 4 этапа. Сначала компоненты пикселей (Red, Green, Blue) изображения представляются в виде чистого кватерниона $iR + jG + kB$, затем осуществляются вышеописанные 3 этапа [6], [7]. Отметим, что в этом случае определяется кватернионный спектр преобразования Фурье.

Пусть R, G, B — матрицы цветных компонент изображения размерности $N \times N$. Последовательность этапов реализации метода улучшения цветных изображений приведена ниже:

1. Формирование кватернионной матрицы $f = iR + jG + kB$,

2. Определение Фурье-спектра по формуле (8),

3. Модификация спектральных компонент

$$F^{(1)}(p, s) = F(p, s) |F(p, s)|^{\alpha-1}, \quad 0 \leq \alpha < 1$$

$$F^{(2)}(p, s) = F(p, s) [lg(|F(p, s)|^2 + 1)]^\beta, \quad \beta \geq 0, \lambda > 0,$$

$$F^{(3)}(p, s) = F(p, s) |F(p, s)|^{\alpha-1} [lg(|F(p, s)|^2 + 1)]^\beta, \quad 0 \leq \alpha < 1, \beta \geq 0, \lambda > 0.$$

4. Обратное кватернионное преобразование Фурье над модифицированной спектральной матрицей ($F^{(1)}$, $F^{(2)}$ или $F^{(3)}$).

4. Меры качества изображений

Одной из главных проблем в задаче улучшения качества изображения является проблема определения количественной меры качества изображения. Однако качество изображения является очень субъективным понятием и не существует такого определения как «наилучшее» изображение. Тем не менее используются несколько мер, в которых контрастность изображения определяет качество полутоновых изображений [8], [9], которые приведены ниже.

Мера улучшения Агаяна (Agaian's measure of enhancement):

$$EME_B(m, n) = \frac{20}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \lg \frac{I_{\max}(B)}{I_{\min}(B)} \quad (9)$$

Мера улучшения по энтропии (measure of enhancement by entropy):

$$EMEE_B(m, n) = \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \frac{I_{\max}(B)}{I_{\min}(B)} \lg \frac{I_{\max}(B)}{I_{\min}(B)} \quad (10)$$

Точная мера улучшения (accurate measure of enhancement):

$$AME_B(m, n) = \frac{20}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \lg \frac{I_{\max}(B) - I_{\min}(B)}{I_{\max}(B) + I_{\min}(B)} \quad (11)$$

Точная мера улучшения по энтропии (accurate measure of enhancement by entropy):

$$AMEE_B(m, n) = \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \frac{I_{\max}(B) - I_{\min}(B)}{I_{\max}(B) + I_{\min}(B)} \lg \frac{I_{\max}(B) - I_{\min}(B)}{I_{\max}(B) + I_{\min}(B)} \quad (12)$$

где B подблок изображения размерности $m \times n$. Для полутоновых изображений $I_{\max}(B)$, $I_{\min}(B)$ — максимальное и минимальное значения яркости пикселей в подблоке B .

Так как в предложенном выше алгоритме улучшения качества цветных изображений изображение рассматривается как кватернионная матрица, то в формулах оценки качества (9)–(12) вместо $I_{\max}(B)$, $I_{\min}(B)$ для подблока B имеет смысл использовать одно из следующих значений:

1. максимальное и минимальное значения яркости $(0.299R + 0.587G + 0.114B)$, соответствующую меру обозначим через Y ;
2. кватернионы с максимальными и минимальными абсолютными значениями, соответствующую меру обозначим через Q ;
3. кватернионы с максимальными и минимальными значениями модулей $\sqrt{R^2 + G^2 + B^2}$ соответствующую меру обозначим через $AbsQ$;
4. максимальное и минимальное от средних значений компонентов цвета $(R + G + B)/3$, соответствующую меру обозначим через $Average$.

5. Экспериментальные результаты

Эксперименты по улучшению цветных изображений проводились с целью выявления наилучших параметров α, β, λ для вышеприведенных мер EME , $EMEE$, AME и $AMEE$, описанных в формулах (9)–(12). Вместо $I_{\max}(B)$, $I_{\min}(B)$ рассматривались значения Y , Q , $AbsQ$ и $Average$ приведенные выше для подблоков порядка 4, 8 и 16 (наилучший результат достигается при порядке 8). Исследовав все точки экстремума функций мер, была поставлена цель выяснить, для каких параметров модификации α, β, λ можно получить наибольшее улучшение качества цветного изображения. Эксперименты показали, что улучшение не достигается для первых правосторонних точек экстремума (минимума для EME , $EMEE$ и максимума для AME , $AMEE$), как это

происходило в случае полутоновых изображений. В результате эксперимента были найдены точки, в которых достигается улучшение качества цветных изображений.

В экспериментах исследовались изображения с разными яркостями, цветами, с резкими и плавными переходами цветовой гаммы. Ниже приведены некоторые результаты экспериментов для цветных изображений размерностей 128x128 Ковер, Лена и Карта.

В экспериментах был использован алгоритм улучшения качества цветных изображений [6], [7] с использованием алгоритма БКПФ, описанного выше. Модификация спектральных компонент изображения осуществлялась по формуле

$$F^{(3)}(p, s) = F(p, s) |F(p, s)|^{\alpha-1} [\lg(|F(p, s)|^2 + 1)]^{\beta}, \quad \alpha = 0.9, \quad \beta \geq 0, \quad \lambda > 0.$$

Для всех мер ЕМЕ, ЕМЕЕ, АМЕ и АМЕЕ наибольшее улучшение качества цветных изображений достигается, когда $I_{\max}(B)$, $I_{\min}(B)$ выбираются из блоков с размерами 8x8.

Ниже приведены графики изменения функций мер качества цветных изображений ЕМЕ и АМЕ. Приведены также параметры λ , β . Черной стрелкой отмечены точки, для которых функция меры достигает первого правостороннего минимума для ЕМЕ и максимума для АМЕ, при которых предполагалось получить улучшение качества изображений. Белой стрелкой отмечены точки, для которых получаем наибольшее улучшение цветного изображения. Если на графиках видна одна стрелка, то эти точки совпадают.

Точки экстремума, которые отмечены черной стрелкой, выбираются следующим образом. Выбирается маска размерами 3x3, в пределах которой рассматриваем значения функции меры качества изображения, которая проходит из точки $\lambda = 1.95$, $\beta = 0.95$ до точки $\lambda = \beta = 0$ с шагом 0.05, двигаясь так, как показано на Рис. 1. Как только точка, находящаяся в середине маски меньше или больше всех остальных точек, соответственно для ЕМЕ, ЕМЕЕ и АМЕ, АМЕЕ, она считается первой правосторонней точкой экстремума (далее назовем ее ППТЭ).

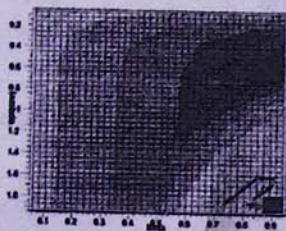


Рис. 1. Движение маски

Точки, отмеченные белой стрелкой – точки экстремума для маски $\{a_{ij}\}_{i,j=1}^3$, если

- 1) $a_{33} < \{a_{22}, a_{23}, a_{24}, a_{32}, a_{34}, a_{42}, a_{43}, a_{44}\}$, и все элементы этого множества меньше элементов множества $\{a_{11}, a_{12}, a_{13}, a_{14}, a_{15}, a_{21}, a_{25}, a_{31}, a_{35}, a_{41}, a_{45}, a_{41}, a_{52}, a_{53}, a_{54}, a_{55}\}$ для меры ЕМЕ;
- 2) $a_{33} > \{a_{22}, a_{23}, a_{24}, a_{32}, a_{34}, a_{42}, a_{43}, a_{44}\}$, и все элементы этого множества больше элементов множества $\{a_{11}, a_{12}, a_{13}, a_{14}, a_{15}, a_{21}, a_{25}, a_{31}, a_{35}, a_{41}, a_{45}, a_{41}, a_{52}, a_{53}, a_{54}, a_{55}\}$ для меры АМЕ. Далее, эти точки назовем точками улучшения качества цветного изображения (ТУКЦИ).



Рис. 2. Функции EME (Y, Q, AbsQ, Average) для изображения Ковер.

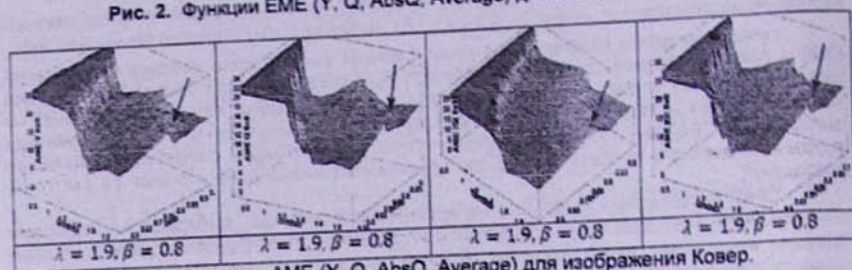


Рис. 3. Функции AME (Y, Q, AbsQ, Average) для изображения Ковер.

Ковер	Y	Q	AbsQ	Average
		Y	Y	Y

Рис. 4. Оригинальное и улучшенное изображения Ковер для точек ППТЭ и ТУКЦИ (см. Рис.2-3)

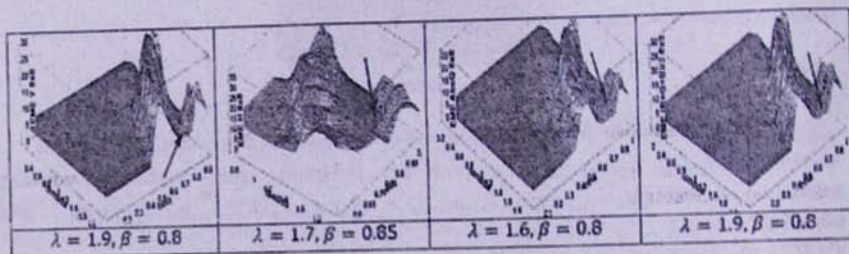


Рис. 5. Функции EME (Y, Q, AbsQ, Average) для изображения Лена.



Рис. 6. Оригинальное и улучшенное изображения Лена для точек ППТЭ и ТУКЦИ (см. Рис.5)

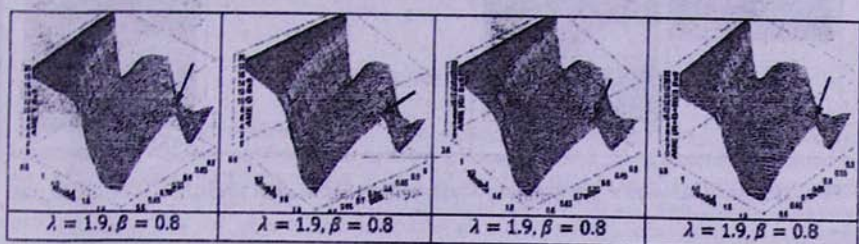


Рис. 7. Функции AME (Y, Q, AbsQ, Average) для изображения Лена.

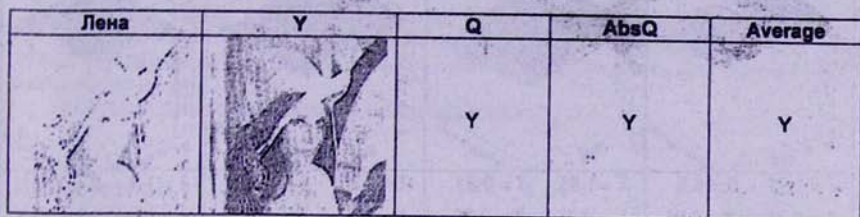


Рис. 8. Оригинальное и улучшенное изображения Лена для точек ППТЭ и ТУКЦИ (см. Рис.7).

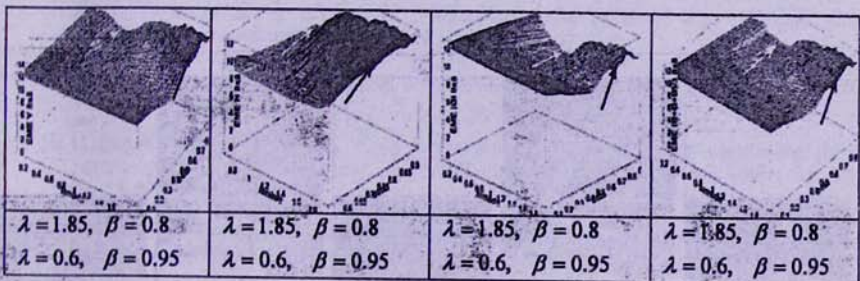


Рис. 9. Функции EME (Y, Q, AbsQ, Average) для изображения Карта. Стрелками черного и белого цвета соответственно отмечены точки ППТЭ и ТУКЦИ.

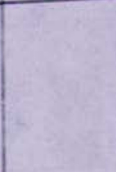
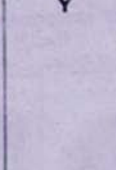
Карта	Y	Q	AbsQ	Average
	 ППТЭ  ТУКЦИ	 Y 	 Y 	 ППТЭ  ТУКЦИ

Рис. 10. Оригинальное и улучшенное изображения Карта для точек ППТЭ и ТУКЦИ (см. 9).

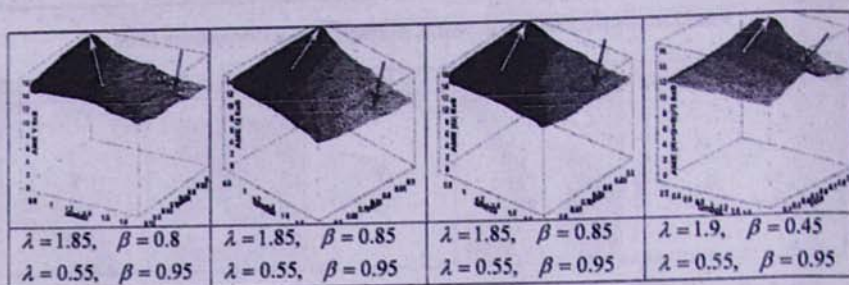
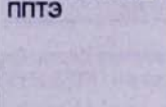
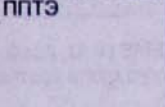


Рис. 11. Функции АМЕ (Y, Q, AbsQ, Average) для изображения Карта.

Карта	Y	Q	AbsQ	Average
	 ППТЭ 	 	 ППТЭ 	 

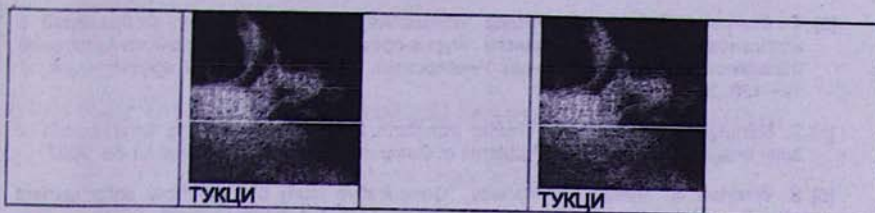


Рис. 12. Оригинальное и улучшенное изображения Карта для точек ППТЭ и ТУКЦИ (см. Рис.11).

Заключение

В работе экспериментально обоснована возможность использования меры качества полутоновых изображений для улучшения цветных изображений, основанного на кватернионном преобразовании Фурье (КПФ). Нет однозначного ответа на вопрос, какая из предложенных мер лучше вследствие разнообразия возможных исходных изображений. Тем не менее, многочисленные эксперименты показали, что хорошие результаты улучшения получаются при использовании функций AME и AMEE. Качество улучшения при модифицированной мере Q лучше, чем при Y, AbsQ и Average, хотя разница не существенна.

Для точек ППТЭ улучшение качества цветных изображений не стабильно в проведенных экспериментах, что имело место для полутоновых изображений, а для точек ТУКЦИ наблюдается улучшение качества цветного изображения (по крайней мере, изображение не ухудшается).

Настоящая работа выполнена в рамках гранта МНТЦ А-1415.

Литература

- [1]. A. K. Jain, "Fundamentals of digital image processing", Prentice Hall, Englewood Cliffs, 2005.
- [2]. R. K. Yarglagadda, E. J. Hersey, "Hadamard matrix analysis and synthesis with applications in signal/image processing", Springer, 1997.
- [3]. S. Mallat, "A wavelet tour of signal processing", Academic Press, London, New York, Tokyo, 1998.
- [4]. H. Sarukhanyan, A. Petrosian, "Construction and application of hybrid wavelet and other parametric orthogonal transform". Journal of Mathematical Imaging and Vision, vol. 23, pp. 25-46, 2005.
- [5]. S. Agaian, K. Panetta and A. M. Grigoryan, "Transform-based image enhancement algorithms with performance measure", IEEE Trans. On Image Processing, vol. 10, No. 3, 2001.
- [6]. Т. Манукян, "Об одном методе улучшения качества цветных изображений с использованием кватернионного Фурье-преобразования", Российско-Армянский

- [6] Т. Манукян, "Об одном методе улучшения качества цветных изображений с использованием кватернионного Фурье-преобразования", Российско-Армянский (Славянский) Государственный Университет. Годичная научная конференция, с. 124-130, 2006.
- [7] T. Manukyan, "Quaternionic Fourier transform for enhancement and compression of color images", Mathematical Problems of Computer Science, vol. 28, pp. 51-59, 2007.
- [8] E. Wharton, S. Agaian, K. Panetta, "Comparative study of logarithmic enhancement algorithms with performance measure", Proceedings, Electronic Imaging, 2006.
- [9] S. S. Agaian, B. Silver, K. A. Panetta, "Transform coefficient histogram-based image enhancement algorithms using contrast entropy", IEEE Trans. on Image Processing, vol. 16, No. 3, 2007.

Ֆուրյեի քվատերնիոն արագ ձևափոխություն և գունավոր պատկերների որակի լավացման չափի ֆունկցիաներ

S. Մանուկյան, Հ. Սարգսյանյան

Ամփոփում

Աշխատանքում առաջարկվում են Ֆուրյեի քվատերնիոն արագ ձևափոխության միջոցով գունավոր պատկերների որակի լավացման մեթոդ, ինչպես նաև գունավոր պատկերների որակի լավացման չափի ֆունկցիաներ: Բերվում են գունավոր պատկերների լավացման օրինակներ: