МЕТОД МЕЖКАНАЛЬНОЙ ГРАДИЕНТНОЙ РЕКОНСТРУКЦИИ ИСКАЖЕННЫХ СИГНАЛОВ ЦВЕТНЫХ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Самойлин Е.А., д.т.н., доцент кафедры ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж, e-mail: es977@mail.ru;

Шипко В.В., адъюнкт ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж, e-mail: shipko.v@bk.ru.

Ключевые слова: цветные изображения, градиентная реконструкция, модель, аппликативные помехи, фильтрация, скользящая апертура.

Введение

Как известно [1, 2], для многих систем с цифровой обработкой и преобразованием цветных изображений является характерным появление аппликативных (импульсных) помех, т.е. независимых случайных искажений отдельных пикселей. Как правило, помехи на цветном изображении являются некоррелированными между цветовыми каналами. Такое возможно, например, в случае неисправности электроники одного из каналов. Но в любом случае, это приводит к потере полезных сигналов.

В работе [3] приведены алгоритмы векторной медианной фильтрации, показывающие свое преимущество в обработке цветных изображений, так как учитывается межканальная корреляция. Тем не менее, медианная фильтрация не в состоянии всегда достоверно восстанавливать значение потерянного сигнала вследствие своей ограниченности только выборкой элементов апертуры фильтра, а так же при преобладающем числе сбойных элементов в апертуре. Между тем, возникающая избыточность при переходе к цветным изображениям открывает новые возможности по восстановлению потерянных вследствие воздействия помех значений сигналов изображений. В частности, в случае искажения значения яркости элемента изображения в одном из каналов возможно оценить это значение по амплитуде яркости соответствующих элементов других каналов.

Цель работы – разработка метода реконструкции сигналов цветных цифровых изображений за счет межканальной избыточности.

Модель межканальной градиентной реконструкции

Используемая модель исходного оцифрованного по строкам i и столбцам j *RGB*-компонентного изображения Λ имеет вид

$$\boldsymbol{\Lambda} = \begin{bmatrix} \lambda_{i,j}^{R} \in [0, ..., 2^{N} - 1] \\ \lambda_{i,j}^{G} \in [0, ..., 2^{N} - 1] \\ \lambda_{i,j}^{B} \in [0, ..., 2^{N} - 1] \end{bmatrix},$$
(1)

Приведен метод реконструкции искаженных или потерянных сигналов компонент цветного цифрового изображения по локальным градиентам в соседних каналах. Показана эффективность представленного метода на примере обработки цветного изображения, искаженного некоррелированными между цветовыми каналами аппликативными помехами.

> где i = 1..m, j = 1..n; m, n - число строк и столбцов изображения; <math>N – степень квантования элементов изобра-

> жения Λ .

Рассмотрим предлагаемую модель межканальной градиентной реконструкции. В связи с тем, что объекты на цветных изображениях коррелируют между собой в цветовых каналах, т.е. совпадают по положению контуров и текстурным перепадам, то можно принять следующее допущение

$$\lambda_{i,j}^{R} - \lambda_{k,s}^{R} \approx \lambda_{i,j}^{G} - \lambda_{k,s}^{G} \approx \lambda_{i,j}^{B} - \lambda_{k,s}^{B}, \qquad (2)$$

где *k*, *s* – координаты любого (случайного) элемента изображения в скользящем окне с центром *i*, *j* (за исключением *i*, *j*-того элемента) в каналах *R*, *G*, *B*. Данное допущение, как показали исследования, справедливо для многих реальных цветных цифровых изображений.

Обозначим $g_{k,s}^{R} = \lambda_{i,j}^{R} - \lambda_{k,s}^{R}$, $g_{k,s}^{G} = \lambda_{i,j}^{G} - \lambda_{k,s}^{G}$, $g_{k,s}^{R} = \lambda_{i,j}^{B} - \lambda_{k,s}^{B}$ и будем называть $g_{k,s}^{R}$, $g_{k,s}^{G}$, $g_{k,s}^{B}$ в дальнейшем однонаправленными градиентами компонент R, G и B соответственно.

Тогда средняя оценка сигнала компоненты *R* по компонентам *G* и *B* имеет вид

$$\hat{\lambda}_{i,j}^{R(G,B)} = \frac{\left(\lambda_{k,s}^{R} + g_{k,s}^{G}\right) + \left(\lambda_{k,s}^{R} + g_{k,s}^{B}\right)}{2}.$$
(3)

Средняя оценка сигнала компоненты *G* по компонентам *R* и *B*:

$$\hat{\lambda}_{l,j}^{G(R,B)} = \frac{\left(\lambda_{k,s}^{G} + g_{k,s}^{R}\right) + \left(\lambda_{k,s}^{G} + g_{k,s}^{B}\right)}{2}.$$
(4)

Средняя оценка сигнала компоненты B по компонентам R и G:

$$\hat{\lambda}_{i,j}^{B(R,G)} = \frac{\left(\lambda_{k,s}^{B} + g_{k,s}^{R}\right) + \left(\lambda_{k,s}^{B} + g_{k,s}^{G}\right)}{2}.$$
(5)

При этом для каждой оценки одной из компонент по другой справедливо правило

$$\hat{\lambda}_{i,j}^{a(b)} = \begin{cases}
\left(\lambda_{k,s}^{a} + g_{k,s}^{b}\right), \text{ при } 0 \leq \left(\lambda_{k,s}^{a} + g_{k,s}^{b}\right) \leq \left(2^{N} - 1\right) \\
\left(2^{N} - 1\right), \text{ при } \left(\lambda_{k,s}^{a} + g_{k,s}^{b}\right) > \left(2^{N} - 1\right) \\
0, \text{ при } \left(\lambda_{k,s}^{a} + g_{k,s}^{b}\right) < 0
\end{cases}$$
(6)

Λ

где a – оцениваемая компонента, $a = (R \lor G \lor B); b$ – компонента, по которой осуществляется оценка, $b = (R \lor G \lor B)$, при $b \neq a$; символ \lor означает логическую операцию «ИЛИ».

Таким образом, испорченный или потерянный элемент любой компоненты восстанавливается по градиентам в соседних каналах.

Межканальная градиентная реконструкция скользящей апертурой

Выражения (2)-(6) описывают общую модель градиентной реконструкции. При восстановлении скользящей апертурой с размерами p = (-P, ..., 0, ..., P) по i и q = (-Q, ..., 0, ..., Q) по j, возможна следующая реализация метода градиентной реконструкции сбойной компоненты.

Вычисляются z = ((2P+1)(2Q+1)) - 1 локальных градиентов центрального элемента апертуры с каждым элементом его окрестности в каналах *R*, *G* и *B*:

$$g_{i\pm p,j\pm q}^{R} = \lambda_{i,j}^{R} - \lambda_{i\pm p,j\pm q}^{R}, (p,q) \neq 0;$$
⁽⁷⁾

$$g_{i\pm p,j\pm q}^{G} = \lambda_{i,j}^{G} - \lambda_{i\pm p,j\pm q}^{G}, (p,q) \neq 0;$$
(8)

$$g^{B}_{i\pm p,j\pm q} = \lambda^{B}_{i,j} - \lambda^{B}_{i\pm p,j\pm q}, (p,q) \neq 0.$$
(9)

В выражениях (7)-(9) переменные *p* и *q* одновременно не равны нулю.

Далее формируются t = 1, ..., z оценок сбойного элемента компоненты R по компонентам G и B:

$$\left(\hat{\lambda}_{i,j}^{R(G,B)}\right)_{t} = \frac{\left(\hat{\lambda}_{i,j}^{R(G)}\right)_{t} + \left(\hat{\lambda}_{i,j}^{R(B)}\right)_{t}}{2}, \qquad (10)$$

$$\mathsf{rde} \left(\lambda_{i,j}^{R(B)} \right)_t = \lambda_{i\pm p,j\pm q} + g_{i\pm p,j\pm q}^{B}, \ (p,q) \neq 0 \\ \left(\lambda_{i,j}^{R(B)} \right)_t = \lambda_{i\pm p,j\pm q}^{R} + g_{i\pm p,j\pm q}^{B}, \ (p,q) \neq 0.$$

Оценки сбойного элемента компоненты G по компонентам R и B:

$$\begin{pmatrix} \hat{\lambda}_{i,j}^{G(R,B)} \end{pmatrix}_{t} = \frac{\left(\hat{\lambda}_{i,j}^{G(R)} \right)_{t} + \left(\hat{\lambda}_{i,j}^{G(B)} \right)_{t}}{2},$$

$$rge \left(\hat{\lambda}_{i,j}^{G(R)} \right)_{t} = \lambda_{i\pm p,j\pm q}^{G} + g_{i\pm p,j\pm q}^{R}, (p,q) \neq 0;$$

$$\left(\hat{\lambda}_{i,j}^{G(B)} \right)_{t} = \lambda_{i\pm p,j\pm q}^{G} + g_{i\pm p,j\pm q}^{B}, (p,q) \neq 0.$$

$$(11)$$

Оценки сбойного элемента компоненты B по компонентам R и G:

$$\left(\hat{\lambda}_{i,j}^{B(R,G)}\right)_{t} = \frac{\left(\hat{\lambda}_{i,j}^{B(R)}\right)_{t} + \left(\hat{\lambda}_{i,j}^{B(G)}\right)_{t}}{2}, \qquad (12)$$

где
$$\left(\hat{\lambda}_{i,j}^{B(R)}\right)_t = \lambda_{i\pm p,j\pm q}^B + g_{i\pm p,j\pm q}^R$$
, $(p,q) \neq 0$;
 $\left(\hat{\lambda}_{i,j}^{B(G)}\right)_t = \lambda_{i\pm p,j\pm q}^B + g_{i\pm p,j\pm q}^G$, $(p,q) \neq 0$.

Общая оценка значения центрального элемента апертуры компонент *R*, *G*, *B* по всем градиентам элементов окрестности в соответствующей апертуре соседних компонент может быть найдена усреднением оценок (10)-(12) по *t*:

$$\hat{\lambda} \mathbf{1}_{i,j}^{R} = z^{-1} \sum_{t=1}^{z} \left(\hat{\lambda}_{i,j}^{R(G,B)} \right)_{t} \,. \tag{13}$$

$$\hat{\lambda} \mathbf{1}_{i,j}^{G} = z^{-1} \sum_{t=1}^{z} \left(\hat{\lambda}_{i,j}^{G(R,B)} \right)_{t} \,. \tag{14}$$

$$\hat{\lambda} \mathbf{1}_{i,j}^{B} = z^{-1} \sum_{t=1}^{z} \left(\hat{\lambda}_{i,j}^{B(R,G)} \right)_{t} \,. \tag{15}$$

Кроме того, общая оценка центрального элемента апертуры компонент *R*, *G* и *B* также может быть представлена как медиана локальных оценок по компонентам:

$$\hat{\lambda} 2_{i,j}^{R} = M \left[\left(\hat{\lambda}_{i,j}^{R(G,B)} \right)_{t} \right].$$
(16)

$$\hat{\lambda} 2_{i,j}^G = M \left[\left(\hat{\lambda}_{i,j}^{G(R,B)} \right)_t \right].$$
(17)

$$\hat{\lambda} 2_{i,j}^{B} = M\left[\left(\hat{\lambda}_{i,j}^{B(R,G)}\right)_{t}\right].$$
(18)

где $M[\cdot]$ – оператор вычисления медианы.

Численный пример межканальной градиентной реконструкции

Для обоснования изложенного метода приведен пример значений элементов апертуры 3×3 каждой компоненты цветного изображения «Лена», его локальных градиентов (разность центрального элемента апертуры с каждым элементом его окрестности) и результат медианной фильтрации и градиентной реконструкции центрального элемента с координатами (*i*= 159, *j* = 169) компонент *R*, *G* и *B* согласно формул (13)-(18).

Фрагменты числовых значений яркостей пикселей изображений размером 3×3 элемента в *R*, *G*, *B* каналах имеют вид:

$$\lambda_{i,j}^{R} = \begin{bmatrix} 199 & 211 & 235 \\ 196 & 158 & 205 \\ 160 & 118 & 177 \end{bmatrix}; \lambda_{i,j}^{G} = \begin{bmatrix} 96 & 110 & 135 \\ 89 & 58 & 104 \\ 45 & 18 & 75 \end{bmatrix};$$

$$\lambda_{i,j}^{B} = \begin{bmatrix} 99 & 114 & 137 \\ 97 & 66 & 110 \\ 62 & 30 & 86 \end{bmatrix}.$$
(19)

Однонаправленные градиенты приведенных фрагментов выглядят следующим образом:

$$g_{i,j}^{R} = \begin{bmatrix} -41 & -53 & -77 \\ -38 & 0 & -47 \\ -2 & 40 & -19 \end{bmatrix}; g_{i,j}^{G} = \begin{bmatrix} -38 & -52 & -77 \\ -31 & 0 & -46 \\ 13 & 40 & -17 \end{bmatrix};$$

$$g_{i,j}^{B} = \begin{bmatrix} -33 & -48 & -71 \\ -31 & 0 & -44 \\ 4 & 36 & -20 \end{bmatrix}.$$

Средние оценки сигналов *R*, *G*, *B* компонент в рассматриваемом случае:

(20)

$$\begin{pmatrix} \hat{\lambda}_{i,j}^{R(G,B)} \end{pmatrix}_{t} = (156, 158.5, 160, 161, 161, 162, 163.5, 168.5) \\ \begin{pmatrix} \hat{\lambda}_{i,j}^{G(R,B)} \end{pmatrix}_{t} = (46, 54.5, 55.5, 56, 58.5, 59, 59.5, 61); \\ \begin{pmatrix} \hat{\lambda}_{i,j}^{B(R,G)} \end{pmatrix}_{t} = (59.5, 59.5, 60, 61.5, 63.5, 67.5, 68, 70).$$

Общие оценки значений центральных элементов:

$$\hat{\lambda} 1^{R}_{i,j} = \begin{bmatrix} 199 & 211 & 235 \\ 196 & 161.3 & 205 \\ 160 & 118 & 177 \end{bmatrix}; \hat{\lambda} 1^{G}_{i,j} = \begin{bmatrix} 96 & 110 & 135 \\ 89 & 56.3 & 104 \\ 45 & 18 & 75 \end{bmatrix};$$

$$\hat{\lambda} 1^{B}_{i,j} = \begin{bmatrix} 99 & 114 & 137 \\ 97 & 63.7 & 110 \\ 62 & 30 & 86 \end{bmatrix}; \hat{\lambda} 2^{G}_{i,j} = \begin{bmatrix} 96 & 110 & 135 \\ 89 & 56.3 & 104 \\ 45 & 18 & 75 \end{bmatrix};$$

$$\hat{\lambda} 2^{R}_{i,j} = \begin{bmatrix} 199 & 211 & 235 \\ 196 & 161 & 205 \\ 160 & 118 & 177 \end{bmatrix}; \hat{\lambda} 2^{G}_{i,j} = \begin{bmatrix} 96 & 110 & 135 \\ 89 & 57.3 & 104 \\ 45 & 18 & 75 \end{bmatrix};$$

$$\hat{\lambda} 2^{B}_{i,j} = \begin{bmatrix} 99 & 114 & 137 \\ 97 & 62.5 & 110 \\ 62 & 30 & 86 \end{bmatrix}.$$

$$(22)$$

В качестве сравнения, эти же оценки, получаемые медианной обработкой, будут иметь вид:

$$M\left[\lambda_{i,j}^{R}\right] = \begin{bmatrix} 199 & 211 & 235\\ 196 & 197.5 & 205\\ 160 & 118 & 177 \end{bmatrix}; M\left[\lambda_{i,j}^{G}\right] = \begin{bmatrix} 96 & 110 & 135\\ 89 & 95.5 & 104\\ 45 & 18 & 75 \end{bmatrix};$$
$$M\left[\lambda_{i,j}^{B}\right] = \begin{bmatrix} 99 & 114 & 137\\ 97 & 98 & 110\\ 62 & 30 & 86 \end{bmatrix}.$$
(23)

На рис.1 представлены фрагменты изображения, соответствующие приведенному выше примеру.

Из формул (19)-(20) видно, что при большом отличии значений в каналах *R*, *G*, *B* их градиенты практически равны. На основе этого свойства имеется возможность реконструкции одной компоненты по другим. Выражения (21)-(23) и рис 1. показывают преимущество градиентной реконструкции по сравнению с медианной фильтрацией в обработке цветных цифровых изображений.

На рис. 2-4, в качестве примера, представлены сечения столбца (j = 60) исходного изображения «Лена» в канале R и для некоторых вариантов градиентной реконструкции компоненты R по компонентам G и B. Каждому элементу изображения компоненты R присваивалось значение оценки в соответствии с выбранным вариантом градиентной реконструкции по соседним каналам.





Рис. 2. Пример обработки изображения: 1 – сечение исходного изображения, 2 – сечение, полученное при медианном восстановлении апертурой 3×3, 3 – сечение при градиентной реконструкции скользящей апертурой размером 3×3 согласно (13)



Рис. 3. Пример обработки изображения:

 сечение исходного изображения, 2 – сечение, полученное при медианном восстановлении апертурой 3×3,

3 – сечение при градиентной реконструкции скользящей апертурой размером 3×3 согласно (16)



Рис. 4. Пример обработки изображения:

1 – сечение исходного изображения, 2 – сечение, полученное при градиентной реконструкции по одному значению пикселя изображения компоненты R, 3 – сечение при градиентной реконструкции по одному значению элемента окрестности в скользящей апертуре размером 3×3 Из рис. 2-4 можно сделать вывод об эффективности восстановления одной компоненты по соседним. Также по рисункам видно, что при различных вариантах градиентной реконструкции с высокой точностью сохраняется форма полезного сигнала. Наиболее качественно произведена реконструкция скользящей апертурой размером 3×3 согласно (16). Кроме того показана возможность градиентной реконструкции всего изображения цветовой компоненты по одному известному его пикселю.

Пример градиентной реконструкции цветных цифровых изображений, искаженных импульсными помехами

На рис. 5 для визуального сравнения приведены результаты обработки цветного цифрового изображения (в черно-белом представлении) с вероятностью наличия 0,4 в каждом цветовом канале импульсных помех некоррелированных между формируемыми *RGB* компонентами. На рис. 6 приведены результаты обработки цветного цифрового изображения (в черно-белом представлении) с вероятностью наличия импульсных помех 0,4 только в канале *G*.



 Рис. 5. Результаты обработки цветного изображения при наличии импульсных помех в каждом канале:
 а – искаженное импульсными помехами изображение,
 б – результат пространственно-избирательного медианного восстановления [4], в – результат градиентной реконструкции, г – результат пространственноизбирательного медианного восстановления [4] после градиентной реконструкции







Рис. 6. Результаты обработки цветного изображения при наличии импульсных помех в одном из каналов: а – искаженное импульсными помехами изображение,

- б результат пространственно-избирательного медианного восстановления [4],
 в – результат градиентной реконструкции,
- г результат повторной процедуры обнаружения помех и градиентной реконструкции

Процедуры восстановления были применены по предварительно обнаруженным сбойным элементам изображения [4].

Заключение

Приведенные результаты исследования показывают более эффективную реконструкцию искаженных сигналов цветных цифровых изображений по локальным градиентам соседних каналов в сравнении с известной медианной фильтрацией. При этом их комбинирование только дополняет возможности качественного восстановления искаженных или потерянных сигналов цветного цифрового изображения.

Литература

1. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. – М.: Техносфера, 2005. – 1072 с.

2. Хуанг Т.С., Эклунд Дж.-О., Нуссбаумер Г.Дж., Зохар Ш., Юстуссон Б.И., Тян Ш.-Г. Быстрые алгоритмы в цифровой обработке изображений. – М.: Радио и связь, 1984. – 224 с.

3. Воскобойников Ю.Е., Белявцев В.Г. Нелинейные алгоритмы фильтрации векторных сигналов // Автометрия. 1999. №5. С. 97-105

4. Самойлин Е.А. Пространственно-избирательная фильтрация изображений // Изв. вузов. Приборостроение. 2006. Т. 49. № 12. С. 7-12.

METHOD OF THE INTERCHANNEL GRADIENT TO RECONSTRUCTIONS DISTORTED SIGNAL OF THE COLOUR DIGITAL IMAGES

Samoylin E.A., Shipko V.V.

The presented method to reconstructions distorted or lost signal components colors digital images on local gradients in nearby channel. Efficiency of the presented method is shown on example of the processing distorted impulse noise colors digital images.

a)