

УДК 004.315

**Червяков Н.И. [Chervyakov N.I],
Ляхов П.А. [Lyakhov P.A.],
Калита Д.И. [Kalita D.I.],
Васькина А.В. [Vaskina A.V.]****ЧИСЛЕННАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА
ФИЛЬТРАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ
С ВЫЧИСЛЕНИЯМИ В СИСТЕМЕ
ОСТАТОЧНЫХ КЛАССОВ****Numerical implementation
of the image filtering method with computations
in Residue Number System**

В статье предлагается численное решение задачи цифровой фильтрации изображения с применением системы остаточных классов вместо известной двоичной арифметики. Обосновывается, что применение непозиционной системы остаточных классов позволит увеличить скорость и снизить энергопотребление приложений цифровой обработки изображений в оттенках серого. Анализируются известные схемы, на основе которых происходит процесс фильтрации изображений. Обосновывается неэффективность применения известных схем, связанная с возможностью возникновения ошибок из-за переполнения динамического диапазона СОК. Приводится новая схема процесса преобразований фильтрации, которая позволяет получать корректные результаты цифровой обработки, не зависящие от размера обрабатываемого цифрового изображения и маски фильтра. Полученные результаты, могут быть использованы при построении специализированных систем цифровой обработки изображений с низким энергопотреблением и высокой скоростью работы.

In this paper a numerical solution of the problem of digital image filtering with the use of the Residue Number System (RNS) instead of the known binary arithmetic proposes. It is substantiated that the application of the non-position RNS will allow increasing the speed and reducing power consumption of digital image processing applications. Analyzed known schemes, based on which the process of image filtration occurs. The inefficiency of the application of known schemes is substantiated, connected with the possibility of errors due to the overflow of the dynamic range of the RNS. A new scheme of the filtration transformation process is given, which allows obtaining correct results of digital processing, independent of the size of the digital image being processed and the filter mask. The obtained results can be used in the construction of specialized digital image processing systems with low power consumption and high speed of operation.

Ключевые слова: цифровая обработка изображений, цифровые фильтры, фильтр Лапласа, система остаточных классов, набор модулей

Key words: digital image processing, digital filter, Laplace filter, residue number system, module set.

Введение

Цифровая обработка изображений имеет широкий спектр применения в различных областях науки и техники, таких как, машинное зрение, медицина, спутниковая связь, военное и охранное дело, автоматический контроль продукции сельского хозяйства [1], графическое и мультимедийное искусство [2] и т.д. Разработанные приложения цифровой обработки изображений, которые используются в перечисленных областях, должны обладать,

с одной стороны, простотой аппаратной реализации, низким энергопотреблением системы, высокой скоростью обработки информации и высоким уровнем безопасности [3], и с другой стороны, использовать математические методы обработки, которые приведут к улучшению визуального качества изображения, которое получается в ходе обработки [4].

Поскольку основным инструментом цифровой обработки являются цифровые фильтры, то в связи с этим идет активный поиск новых эффективных методов цифровой обработки изображений, которые базируются на разных численных методах и алгоритмах [5]. Применение таких методов позволит уменьшить потребляемую мощность и увеличить скорость обработки данных в приложениях цифровой обработки изображений. Система остаточных классов (СОК) является перспективным инструментом в решении обозначенных задач. Благодаря свойству параллельного выполнения операций СОК может быть эффективно использована в приложениях с преобладающей долей операций сложения, вычитания и умножения [6]. Одним из таких приложений является цифровая обработка изображений, в частности цифровая фильтрация [4].

В данной статье будет показана численная реализация процесса фильтрации на конкретном фрагменте изображения. Рассмотрены известные схемы преобразователей, использующихся в обработке, а также предложена новая, которая позволяет получать корректные результаты обработки.

Материалы и методы

1. Введение в цифровую обработку изображений

Цифровую фильтрацию определяет используемый в процессе цифровой фильтр. Говоря о процессе цифровой фильтрации (обработки) изображений следует отметить, что в данном случае цифровой фильтр позволяет накладывать на изображение различные эффекты, например: размытие, резкость, деформация, шум и т. д. При этом под цифровым фильтром понимается математический алгоритм обработки изображения. Большая группа цифровых фильтров имеет один и тот же алгоритм вычислений, но эффект, накладываемый фильтром на изображение, зависит от коэффициентов, используемых в алгоритме [5]. Чаще всего в процессе цифровой обработки изображений используют фильтры с конечной импульсной характеристикой, основанные на теории линейных систем и применении двумерных сверток.

Под сверткой понимается способ представления какого-либо векторного значения скалярным значением. Применительно к обработке изображений векторное значение представляет собой цвет группы пикселей, а скалярное значение, получаемое на основе свертки, представляет собой цвет пикселя, получаемого в результате применения к исходному изображению какого-либо эффекта.

Обработка изображения с применением такого рода фильтров описывается следующей формулой [2]:

$$C_{\text{нов}}[i][j] = \sum_{k=0}^m \sum_{l=0}^n a_{k,l} C_{\text{old}} \left[i - \frac{m}{2} \right] \left[j - \frac{n}{2} \right] \quad (1)$$

где m и n – это константы фильтра, которые задают двумерный размер фильтра;
 a – коэффициенты фильтра, определяющие тот эффект, который накладывает фильтр.

Таким образом, чтобы применить фильтр к изображению необходимо провести вычисления для каждого из значений пикселей. При этом, каждый из пикселей рассматривается вместе с матрицей, центральным элементом которой он является. Перемножаем соответствующие значения двух матриц и их сумму присваиваем рассматриваемой точке.

В данной статье будем рассматривать изображение в оттенках серого. В таком формате изображение представляет собой прямоугольный массив целых чисел (пикселей). Количество уровней серого являются целыми степенями 2, то есть пиксель представляет яркость или темноту [2, 4]. Таким образом, чем больше число, кодирующее пиксель, тем ярче изображение в этой точке. В стандартных приложениях обработки изображений величины пикселей изображения в оттенках серого кодируются 8-битными числами и находятся в диапазоне [0,255] причем 0 обозначает черный цвет, 255 белый цвет. Если в результате обработки изображения получается отрицательное число, то оно заменяется на 0 (черный цвет). В случае получения числа, большего чем 255, оно заменяется на 255 (белый цвет). На рисунке 1 схематически представлен принцип отображения чисел в цвет пикселя изображения в оттенках серого.

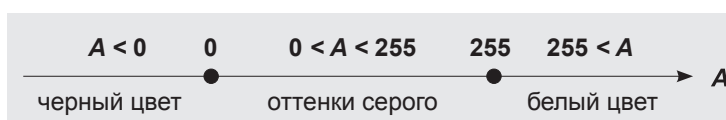


Рисунок 1. Зависимость цветности пикселя, представленного в оттенках серого, от величины кодового числа.

В качестве иллюстративного примера работы фильтра рассмотрим фильтр Лапласа для повышения резкости, который также будем использовать в дальнейшем для численных расчетов. Пример маски фильтра Лапласа представляет собой матрицу вида:

$$[a_{k,l}] = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 9 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Маска фильтра определяется как сумма вторых производных и вычисляется как сумма перепадов на соседях центрального пикселя.

Применение фильтра Лапласа к цифровому изображению позволяет повысить контрастность изображения, увеличивая его резкость. Фильтр такого типа называют фильтрами высоких частот. Ядро фильтра имеет значение, большее 1, в точке (0,0). Общая сумма всех значений равна 1. Эффект повышения резкости достигается за счет того, что фильтр подчеркивает разницу между интенсивностями соседних пикселей, удаляя эти интенсивности друг от друга [4]. Причем, эффект резкости будет тем сильнее, чем больше значение центрального члена ядра. Признаком применения такого фильтра является получение на изображении заметных светлых и менее заметных темных ореолов границ. На рисунке 2 приведен результат работы фильтра повышения резкости. Рисунок 2б был сдвинут на 128 для улучшения визуального восприятия.



Рисунок 2. а) Изображение «девушка» до обработки;
б) Изображение «девушка» после обработки фильтром Лапласа для выделения контуров.

2. Введение в систему остаточных классов

В СОК числа представляются в базисе взаимно-простых чисел, называемых модулями $\beta = \{m_1, \dots, m_n\}$, $\text{НОД}(m_i, m_j) = 1$, для $i \neq j$. Произведение всех модулей СОК $M = \prod_{i=1}^n m_i$ называется динамическим диапазоном системы. Любое целое число $0 \leq X < M$ может быть единственным образом представлено в СОК в виде вектора $\{x_1, x_1, \dots, x_n\}$, где $x_i = |X|_{m_i} = X \bmod m_i$ [7].

В случае использования отрицательных чисел, число располагается в следующих интервалах:

$$-\frac{M-1}{2} \leq X \leq \frac{M-1}{2}, \text{ для нечетных } M, \quad (3)$$

$$-\frac{M}{2} \leq X \leq \frac{M}{2} - 1, \text{ для четных } M, \quad (4)$$

Восстановление числа X по остаткам $\{x_1, x_1, \dots, x_n\}$ основано на Китайской Теореме об Остатках (КТО) [6]:

$$X = \left| \sum_{i=0}^n \left| M_i^{-1} \right|_{m_i} x_i \right|_{M_i} \Big|_M, \quad (5)$$

где $M_i = M/m_i$.

Элемент $\left| M_i^{-1} \right|_{m_i}$ означает мультипликативный обратный элемент для M_i , по модулю m_i .

В процессе фильтрации изображений будем использовать Китайскую Теорему об Остатках, а также Модифицированную Китайскую теорему об остатках. Применяв КТО в совокупности с LUT-таблицами можно выполнять операции над числами с наименьшими потерями информации. Применение модифицированной КТО поможет уменьшить динамический диапазон системы и как следствие повысить эффективность реализации.

3. Архитектурная организация процесса фильтрации изображения

Численная организация процесса фильтрации напрямую связана с его структурной схемой. Поэтому, говоря о фильтрации изображения, особое место должна занимать схема этого процесса, которая должна включать в себя поэтапно каждый процесс.

Для выполнения операций в СОК необходимо первоначально преобразовать числа из позиционной системы счисления в систему остаточных классов, т.е. применить операцию прямого преобразования ПСС-СОК [7]. Таким образом, схема, на основе которой должно проходить это преобразование должна сначала получить значения пикселей, после этого преобразовать их в представление СОК, а затем выполнять цифровую обработку изображений, а именно цифровую фильтрацию. После прохождения описанной операции к числам, представленным в СОК, должна быть применена обратная операция для получения информации в ПСС. Исходя из этого, в [8] авторы представляют операцию фильтрации изображения как процесс, состоящий из трех этапов. Каждый из этих этапов описывается следующим образом:

1. Преобразование значений пикселей из позиционной системы счисления в систему остаточных классов. Этот этап включает в себя решение нескольких задач: чтение значения пикселей входного цифрового изображения в виде десятичных или двоичных чисел; выбор соответствующего набора модулей СОК, который удовлетворяет ограничению, накладываемому на динамический диапазон системы; создание справочной LUT-таблицы для более быстрой обработки; присваивание новых значений пикселей в соответствии с СОК, полученных на этом этапе.

2. Операция фильтрации изображения с вычислениями в СОК.

3. Обратное преобразование полученных значений пикселей из СОК в ПСС. Этап включает в себя: получение значений пикселей в виде остатков в СОК; определение числа остатков; преобразование каждого остатка в свою первоначальную форму с применением LUT-таблиц.

Особое место в описанном процессе прямого и обратного преобразований из ПСС в СОК и обратно отводится просмотрным LUT-таблицам, так как они повышают работу всей системы в целом. Используются таблицы во время перехода значений пикселей из ПСС в СОК и обратно, что естественно приводит к более быстрому преобразованию значений.

Покажем свою обобщенную модифицированную схему, придерживаясь которой можно получить обработанное цифровое изображение (рис. 5).

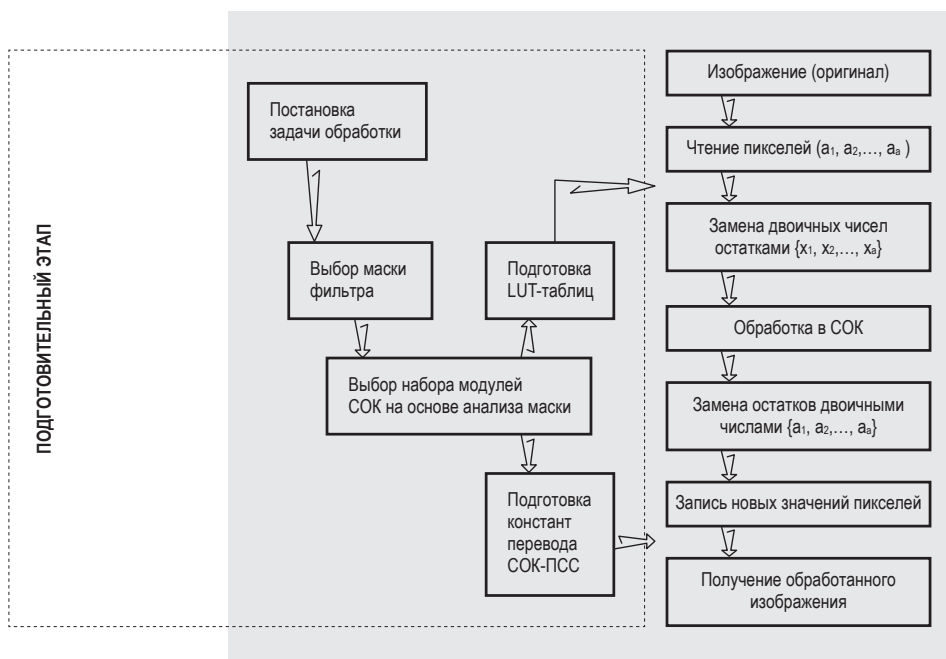


Рисунок 5. Предлагаемая схема процесса фильтрации изображения.

Отличительной особенностью предлагаемой схемы является то, что в ней учтен подготовительный этап фильтрации, в процессе которого происходит выбор маски фильтра и выбор набора модулей СОК, который занимает одно из важных мест, в процессе обработки изображений. Причем эти операции зависят от изначально поставленной задачи обработки. В [1] выбор набора модулей СОК происходит уже после чтения значений пикселей изображений, что может привести к получению некорректных результатов работы системы, обработки изображений [9, 10].

Результаты и обсуждение

1. Численная реализация фильтрации на примере изображения в оттенках серого

Рассмотрим более подробно влияние цифровой фильтрации на изображение на примере известных фильтров Привита, Собеля, Гаусса, Лапласиана. Фильтрация будет проводиться в пространственной области с применением изображения в оттенках серого. Для представления одного изображения будем использовать двумерную матрицу размером $M \times N$. Значение каждого элемента из этой матрицы показывает степень яркости, при этом каждый элемент принимает 8 битное значение, которое может варьироваться в пределах 0 – 255. В математическом пакете MATLAB такое представление изображения запишется следующим образом [11]:

$$F(x, y) = \begin{bmatrix} F(1,1) & F(1,2) & \dots & F(1,N) \\ F(2,1) & F(2,2) & \dots & F(2,N) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ F(M,1) & F(M,2) & \dots & F(M,N) \end{bmatrix} \quad (6)$$

Сочетание функции и маски изменений уровней серого, записанного в виде формулы (8) называется фильтром. Для того чтобы применить линейный фильтр к массиву изображения необходимо перемножить все коэффициенты изображения на соответствующие прилегающие элементы из фильтра (маски) и суммировать все полученные значения [2]. В случае выполнения фильтрации в пространственной области, маска накладывается на соответствующий участок изображения, двигается на нем, а в качестве вычисляемых значений используются соответствующие значения пикселей, которые совпали при накладывании маски [4]. Таким образом, после такой операции получается новое изображение в оттенках серого, вычисленное в соответствии с предложенной маской. Математическая интерпретация описанной операции соответствует формуле (7):

$$g(x, y) = \sum_{s=-a}^a \sum_{t=-b}^b w(s, t) f(x + s, y + t), \quad (7)$$

где a и b – положительные числа;
 $f(x, y)$ – функция для заданного фильтра;
 $w(s, t)$ – функция для значений выходного изображения.

Предположим, что коэффициенты маски размером 3×3 можно представить в виде:

$$\begin{bmatrix} w(-1,1) & w(-1,0) & w(-1,-1) \\ w(0,1) & w(0,0) & w(0,-1) \\ w(1,1) & w(1,0) & w(1,-1) \end{bmatrix} \quad (8)$$

Коэффициенты значений пикселей имеют следующие значения:

$$\begin{bmatrix} f(x-1, x+1) & f(x-1, y) & f(x-1, y-1) \\ f(x, y+1) & f(x, y) & f(x, y-1) \\ f(x+1, y+1) & f(x+1, y) & f(x+1, y-1) \end{bmatrix} \quad (9)$$

Перемножим две представленные матрицы коэффициентов (8) и (9) между собой и просуммируем полученные значения [11]:

$$\sum_{s=-1}^1 \sum_{t=-1}^1 w(s, t) f(x+s, y+t)$$

Таким образом, процесс фильтрации можно поделить на 3 этапа:

1. Расположение заданной маски на фрагменте изображения.
2. Умножение коэффициентов фильтра на смежные коэффициенты изображения.
3. Нахождение общей суммы полученных значений.

Все множество фильтров, которые используются для получения улучшения качества цифрового изображения можно поделить на две категории: низкочастотные и высокочастотные фильтры. Обработка цифрового изображения низкочастотным фильтром, который проходит через полосу низкочастотных пикселей и изменяет высокочастотные пиксели, может привести к скрытым изображениям. Фильтр высоких частот, который проходит через высокочастотные пиксели и вносит изменения в полосу низких частот пикселей, приводит к появлению шума на краях изображения [5]. Наиболее известными фильтрами, применяемыми для решения обозначенных проблем, которые так же применяются для решения задач повышения или понижения резкости изображения, выделения контура, шумопонижения и т. д. являются следующие фильтры:

Фильтры Превитта для выделения контура:

$$P_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad P_y = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

Фильтры Собеля для выделения контура:

$$P_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad P_y = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

Поскольку операция фильтрации изображения согласно формуле (1) требует большого количества выполнения арифметических операций сложения и умножения значений пикселей с соответствующей маской, то можно сделать вывод, что для операций, связанных с цифровой обработкой изображений необходимо повышение скорости выполнения этих операций. Кроме того, увеличение скорости работы системы приведет к понижению энергопотребления цифрового приложения. Подходящим решением

проблемы является применение непозиционной системы счисления. Помимо свойства высокого параллелизма, которым обладает СОК, архитектура такой системы может использовать в своей работе комбинационные схемы, а также просмотрные таблицы (LUT-таблицы). Эти преимущества, заключающиеся в выработке достаточно высокой скорости работы системы и малой потребляемой мощности, подчеркивают преимущества применения СОК в приложениях цифровой обработке изображений [8].

В [9, 10, 12, 13] описан актуальный вопрос, возникающий при цифровой обработке изображений, а именно выбор корректного набора модулей. Поэтому, исходя из результатов полученных ранее, применим, предлагаемый нами в [10] набор модулей и для решения данной задачи. Предлагаемый набор модулей имеет вид: $\{5, 7, 9, 16\}$.

2. Моделирование численного метода

Покажем работу данного набора модулей на примере конкретного изображения. В качестве входного изображения будем рассматривать изображение «девушка» в оттенках серого. Входные значения пикселей в этом изображении представлены в виде:

$$\begin{bmatrix} 252 & 254 & 250 & 250 \\ 250 & 253 & 254 & 251 \\ 254 & 253 & 252 & 251 \\ 254 & 252 & 253 & 254 \end{bmatrix} \quad (10)$$

Преобразуем все имеющиеся значения пикселей изображения (10) и значения маски фильтра (2) в значения, представленные в СОК. В качестве выбранного набора модулей будем использовать набор $\{5, 7, 9, 16\}$. Динамический диапазон набора $M = 5 \cdot 7 \cdot 9 \cdot 16 = 5040$ подходит для цифровых изображений, представленных в оттенках серого. Тогда для выбранных значений пикселей получим:

$$\begin{bmatrix} \{2,0,0,12\} & \{4,2,2,14\} & \{0,5,7,10\} & \{0,5,7,10\} \\ \{0,5,7,10\} & \{3,1,1,13\} & \{4,2,2,14\} & \{1,6,8,11\} \\ \{4,2,2,14\} & \{3,1,1,13\} & \{2,0,0,12\} & \{1,6,8,11\} \\ \{4,2,2,14\} & \{2,0,0,12\} & \{3,1,1,13\} & \{4,2,2,14\} \end{bmatrix}$$

Значения маски фильтра переписутся в виде:

$$\begin{bmatrix} \{4,6,8,15\} & \{4,6,8,15\} & \{4,6,8,15\} \\ \{4,6,8,15\} & \{4,2,0,9\} & \{4,6,8,15\} \\ \{4,6,8,15\} & \{4,6,8,15\} & \{4,6,8,15\} \end{bmatrix}$$

Учитывая использование LUT-таблицы в обратном преобразовании при переходе от системы остаточных классов к позиционной сис-

теме счисления необходимо построить таблицу поиска для значений пикселей цифровых изображений (табл. 1).

Таблица 1. Значения пикселей цифровых изображений в ПСС и СОК

Значения пикселей в наборе модулей {5,7,9,16}	Значения пикселей в позиционной системе счисления
{0,5,7,10}	250
{1,6,8,11}	251
{2,0,0,12}	252
{3,1,1,13}	253
{4,2,2,14}	254

Рассмотрим более подробно процесс фильтрации значений изображения. В качестве обрабатываемого массива данных будем использовать массив того же размера 3×3 , что и маска фильтра. При умножении значений изображений на соответствующие значения фильтра получим:

$$\begin{bmatrix} \{2,0,0,12\} & \{4,2,2,14\} & \{0,5,7,10\} \\ \{0,5,7,10\} & \{3,1,1,13\} & \{4,2,2,14\} \\ \{4,2,2,14\} & \{3,1,1,13\} & \{2,0,0,12\} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \{4,6,8,15\} & \{4,6,8,15\} & \{4,6,8,15\} \\ \{4,6,8,15\} & \{4,2,0,9\} & \{4,6,8,15\} \\ \{4,6,8,15\} & \{4,6,8,15\} & \{4,6,8,15\} \end{bmatrix} = \\ = \begin{bmatrix} \{8,0,0,180\} & \{16,12,16,210\} & \{0,30,56,150\} \\ \{0,30,56,150\} & \{12,2,0,117\} & \{16,12,16,210\} \\ \{16,12,16,210\} & \{12,6,8,195\} & \{8,0,0,180\} \end{bmatrix}.$$

Далее сложим все соответственные коэффициенты друг с другом, после чего получим остаток каждого по модулю. Полученный результат $\{3,6,6,2\}$ соответствует значению первого пикселя изображения, представленного в СОК. Проведем аналогичную операцию для оставшихся значений пикселей, после чего получим:

$$\begin{bmatrix} \{3,6,6,2\} & \{2,6,2,0\} \\ \{0,3,3,15\} & \{2,2,4,7\} \end{bmatrix}. \quad (11)$$

Для перевода найденных значений из представления в СОК обратно в ПСС применим КТО. Поскольку найденный динамический диапазон СОК равен $P = 5 \cdot 7 \cdot 9 \cdot 16 = 5040$, тогда по формуле $P = P/P_i$ найдем диапазоны для каждого из четырех модулей $\{5, 7, 9, 16\}$ и остатки при делении:

$$\begin{aligned} P_1 &= 1008, & 1008 \bmod 5 &= 3 \\ P_2 &= 720, & 720 \bmod 7 &= 6 \\ P_3 &= 560, & 560 \bmod 9 &= 6 \\ P_4 &= 315, & 315 \bmod 16 &= 1 \end{aligned}$$

Применяя обратную операцию, получаем следующие значения:

$$3 \cdot x_1 = 1 \bmod 5 \rightarrow x_1 = 2$$

$$6 \cdot x_2 = 1 \bmod 7 \rightarrow x_2 = 6$$

$$2 \cdot x_3 = 1 \bmod 9 \rightarrow x_3 = 5$$

$$11 \cdot x_4 = 1 \bmod 16 \rightarrow x_4 = 3$$

Найдем массив B_i :

$$B_1 = P_1 \cdot x_1 = 1008 \cdot 2 = 2016;$$

$$B_2 = P_2 \cdot x_2 = 720 \cdot 6 = 4320;$$

$$B_3 = P_3 \cdot x_3 = 560 \cdot 5 = 2800;$$

$$B_4 = P_4 \cdot x_4 = 315 \cdot 3 = 945;$$

Тогда полученное значение пикселя после обратной операции преобразования будет записано как:

$$A = 3 \cdot 2016 + 6 \cdot 4320 + 6 \cdot 2800 + 2 \cdot 945 = 50658,$$

$$50658 \bmod 5040 = 258.$$

Проведя аналогичные операции для каждого из значений (11) получим преобразованные значения пикселей из СОК в ПСС:

$$\begin{bmatrix} 258 & 272 \\ 255 & 247 \end{bmatrix}.$$

Все вычисления производились с использованием пакета прикладных программ MATLAB. Результатами моделирования являются, полученные гистограммы для цифровых изображений для входного изображения и изображения, полученного после фильтрации (рисунки 3 и 4 соответственно). По горизонтальной оси каждого графика отложены значения уровней яркости r_k , а по вертикальной – значения гистограммы $h(r_k) = n_k$. Тем самым, эти графики выражают зависимости $h(r_k) = n_k$ от r_k или $p(r_k) = n_k / n$ от r_k (в случае, если значения гистограммы нормализованы) [2]. Из этих графиков видно, что ненулевые уровни гистограммы покрывают широкую часть диапазона яркостей, а также, что распределение значений пикселей не слишком отличается от равномерного, за исключением числа пиков, возвышающихся над остальными значениями. Интуитивно можно сделать вывод, что изображение, распределение значений элементов которого близко к равномерному и занимает весь диапазон возможных значений яркостей, будет выглядеть высококонтрастным и будет содержать большое количество полутонов [8].

Таким образом, основываясь только на информации, содержащейся в гистограмме исходного изображения, можно построить функцию преобразования, которая позволит автоматически добиваться такого эффекта.

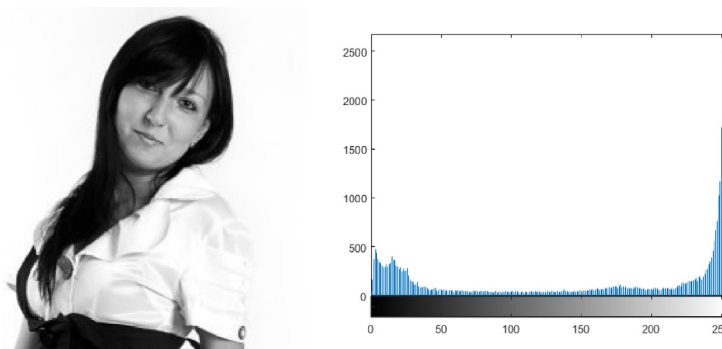


Рисунок 3. Входное изображение «девушка» до обработки фильтром и его гистограмма значений изображения.

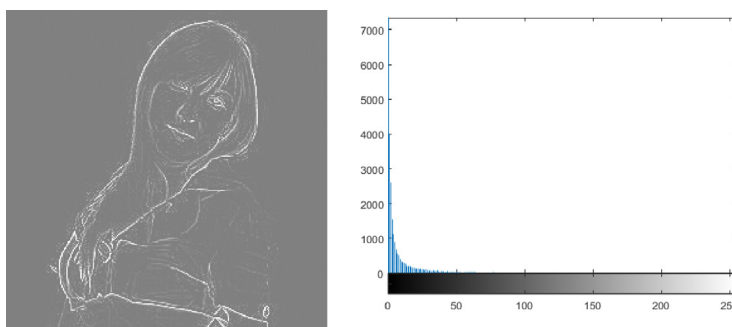


Рисунок 4. Обработанное фильтром изображение «девушка» и его гистограмма значений изображения.

Выводы

В статье исследован вопрос о численной реализации метода цифровой фильтрации изображений с использованием вычислений в системе остаточных классов. Показано, что предложенный численный метод, использующийся при цифровой фильтрации изображений позволяет сократить вычислительные затраты, возникающие при выполнении арифметических операций сложения и умножения. Эффективность метода достигается за счет применения системы остаточных классов, которая способна распараллелить процесс вычислений. Разработанная архитектурная организация процесса цифровой фильтрации позволяет получить корректный результат обработки, независимо от размера изображения и маски фильтра. Преимущества схемы обусловлены тем, что она учитывает подготовительный этап фильтрации, в процессе которого происходит выбор набора модулей СОК и маски фильтра непосредственно до самого процесса фильтрации.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Гранта Президента Российской Федерации МК-5980.2016.9.

Библиографический список

1. Галушкин А.И. Нейрокомпьютеры для обработки изображений / А.И. Галушкин, Н.С. Томашевич, Е.И. Рябцев // Нейрокомпьютеры в прикладных задачах обработки изображений. Кн. 25. 2007. 74–109 с.
2. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений. Издание 3-е, исправленное и дополненное [Текст] / Р. Гонсалес, Р. Вудс // М.: Техносфера. 2012. 1104 с.
3. Дамьяновски В. CCTV. Библия охранного телевидения: Перевод с английского / В. Дамьяновски // Москва: Ай-Эс-Пресс, 2003. 344 с.
4. Желтов С.Ю. Обработка и анализ изображений в задачах машинного зрения [Текст] / С.Ю. Желтов // М.: Физматкнига, 2010. 672 с.
5. Белодедов М.В. Методы проектирования цифровых фильтров: Учебное пособие / М. В. Белодедов // Волгоград: Издательство Волгоградского государственного университета, 2004. – 60 с.
6. Червяков Н.И. Нейрокомпьютеры в остаточных классах / Н.И. Червяков, П.А. Сахнюк, А.В. Шапошников, А.Н. Макоха А.Н // М.: Радиотехника, 2003. 272 с.
7. Акушский И.Я. Машинная арифметика в остаточных классах / И.Я. Акушский, Д.И. Юдицкий // М.: Советское радио, 1968. 440 с.
8. Taleshmekeail D.K. The use of residue number system for improving the digital image processing / D. K. Taleshmekeail, A. Mousavi // In Proc. of 10th International Conference on Signal Processing, 2010, pp. 775–780.
9. Червяков Н.И. О выборе диапазона системы остаточных классов для цифровой обработки изображений / Н.И. Червяков, П.А. Ляхов, Д.И. Калита // Инфокоммуникационные технологии. 2016. Т. 14. №2. С. 111-122.
10. Chervyakov N.I. Effect of RNS dynamic range on grayscale image filtering / N.I. Chervyakov, P.A. Lyakhov, D.I. Kalita, K.S. Shulzhenko // 2016 XV International Symposium Problems of Redundancy in Information and Control Systems (REDUNDANCY), St. Petersburg, 2016, pp. 33-37.
11. Курячий М.И. Цифровая обработка сигналов: учеб. пособие для вузов / М.И. Курячий // Томск: Томск. гос. Университет систем упр. и радио-электроники. 2009. – 190 с.
12. Wang W. A high-speed residue-to-binary converter for three-moduli $(2^k, 2^k, 1, 2^{k-1} - 1)$ RNS and a scheme for its VLSI implementation / W. Wang, M.N. Swamy, M.O. Ahmad, Y. Wang // IEEE Trans. on Circuits and Systems-II: Analog and Digital Signal Processing. 2000. 47, No. 12. Pp. 1576–1581.
13. Wang W. A study of the residue-to-binary converters for the three-moduli sets / W. Wang, M.N. Swamy, M.O. Ahmad, Y. Wang // IEEE Trans. Circuits Syst. I: Fundamental Theory Appl., 50: 235-243.

References

1. Galyshkin A.I. Neyrokomputery dlya obrabotki izobrazhenii (Neurocomputers for image processing) / A.I. Galyshkin, N.C. Tomashevich, E.I. Ryabcev // Neyrokomputery v prikladnykh zadakh obrabotki izobrazhenii. Kn. 25. 2007. 74–109 c.
2. Gonsales R. Cifrovaya obrabotka izobrazhenii (Digital image processing). Izdanie 3, ispravlennoe i dopolnennoe [Tekst] / R. Gonsales, R. Vyds // M.: Texnosfera. 2012. 1104 c.
3. Damyanovski V. CCTV. Bibliya oxrannogo televideniya (Bible guarding television) / V. Damyanovski // Perevod s angliiskogo – Moskva. 2003. 344 c.
4. Jeltov S.U. Obrabotka i analiz izobrazhenii v zadachakh mashinnogo zreniya [Tekst] (Image processing and analysis in computer vision problems) / S. U. Jeltov // M.: Fizmatkniga. 2010. 672 c.
5. Belodedov M.V. Metody proektirovaniya cifrovyykh filtrov (Methods for designing digital filters) / M. V. Belodedov // Ychebnoe posobie. – Volgograd. 2004. 60 c.
6. Chervyakov N.I. Neyrokomputery v ostatochnykh klassakh (Neurocomputers in the residual classes) / N.I. Chervyakov, P.A. Shaposhnikov, A.N. Makoha. M.: Radiotekhnika, 2003. 272 c.
7. Akyshskii I.Y. Mashinnaya arifmetika v ostatochnykh klassakh (Machine arithmetic in the residual classes) / I.Y. Akyshskii, D.I. Udickii // M.: Sovetskoe radio, 1968. 440 c.
8. Taleshmekeail D.K. The use of residue number system for improving the digital image processing / D.K. Taleshmekeail, A. Mousavi // In Proc. of 10th International Conference on Signal Processing, 2010, pp. 775-780.
9. Chervyakov N.I. O vyboire diapazona sistemy ostatochnykh klassov dlya cifrovy obrabotki izobrazhenii (About the choice of the range of the residue number system for digital image processing) / N.I. Chervyakov, P.A. Lyaxov, D.I. Kalita // Infokommunikatsionnye tekhnologii. 2016. T. 14. №2. C. 111–122.
10. Chervyakov N.I. Effect of RNS dynamic range on grayscale image filtering / N.I. Chervyakov, P.A. Lyakhov, D.I. Kalita, K.S. Shulzhenko // 2016 XV International Symposium Problems of Redundancy in Information and Control Systems (REDUNDANCY), St. Petersburg, 2016, pp. 33-37.
11. Kuryachii M.I. Cifrovaya obrabotka signalov (Digital signal processing) / M.I. Kuryachii // Tomsk. gos Universitet sisten upr. i radioelektroniki. Tomsk. 2009. 190 c.
12. Wang W. A high-speed residue-to-binary converter for three-moduli $(2^k, 2^k, 1, 2^{k-1} - 1)$ RNS and a scheme for its VLSI implementation / W. Wang, M.N. Swamy, M.O. Ahmad, Y. Wang // IEEE Trans. on Circuits and Systems-II: Analog and Digital Signal Processing. 2000. 47, No. 12. Pp. 1576–1581.
13. Wang W. A study of the residue-to-binary converters for the three-moduli sets / W. Wang, M.N. Swamy, M.O. Ahmad, Y. Wang // IEEE Trans. Circuits Syst. I: Fundamental Theory Appl., 50: 235–243.