

Применение интерполирования к мультиспектральным матричным фотоприемникам

В.Л. Жбанова¹, И.В. Якименко².

^{1,2} Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске, Энергетический проезд, д. 1, Смоленск, 214013, РФ

Аннотация

Целью исследования является применение интерполирования к разработанным шаблонам двухслойных матриц. В рамках поставленной цели были сформулированы следующие задачи: исследование и применение линейного и адаптивного методов интерполирования. Самый простой метод интерполирует каждый цвет самостоятельно, используя какой-то линейный алгоритм интерполяции. Это самый быстрый метод, который имеет самое низкое качество обработки изображений. Адаптивные методы включают различные типы интерполяционных фильтров: пиксельная основа в зависимости от некоторых эвристических или математических моделей локальной области фотографии вокруг текущей точки. На примере трех многослойных матриц с ячейками регистрации видимого и ближнего ИК диапазонов применили изучаемые методы интерполяции. В зависимости от количества используемых переменных в уравнении, используя линейную интерполяцию, получаем более точные значения при использовании четырех известных значений, чем при использовании двух известных соседних ячеек, но разница в погрешности небольшая. В стандартном адаптивном методе используют 4 соседние ячейки для нахождения необходимого цвета. Это делает уравнение более сложным в расчете. Для этой же ячейки синий и красный цвет найти можно только с использованием двух дополнительных ячеек. Это упрощает уравнения в два раза, а значит и скорость обработки изображения тоже увеличивается в 2 раза. При этом погрешность нахождения синего и красного цвета через две дополнительные ячейки остается примерно такой, как и при нахождении зеленого цвета через 4 ячейки.

Ключевые слова 1

Матричный фотоприемник, интерполяция, цветоделение, многослойный приемник, инфракрасный диапазон.

Application of Interpolation to Multispectral Array Photodetectors

V.L. Zhbanova¹, I.V. Yakimenko²

^{1,2} The Branch of National Research University «Moscow Power Engineering Institute» in Smolensk

Abstract

The purpose of the research is to apply interpolation to the developed templates of two-layer matrices. Within the framework of this purpose, the following tasks were formulated: research and application of linear and adaptive interpolation methods. The simplest method interpolates each color on its own using some sort of linear interpolation algorithm. This is the fastest method and has the lowest image processing quality. Adaptive methods include various types of interpolation filters: pixel based depending on some heuristic or mathematical models of the local area of the photo around the current point. On the example of three multilayer matrices with cells for registration of the visible and near-IR ranges, the studied interpolation methods were used. Depending on the number of variables used in the equation, using linear interpolation, we get more accurate values when using four known values than when using two known neighboring cells, but the difference in error is small. The standard adaptive method uses 4 adjacent cells to find the

ГрафиКон 2022: 32-я Международная конференция по компьютерной графике и машинному зрению, 19-22 сентября 2022 г., Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина, Рязань, Россия

EMAIL: vera-zhbanova@yandex.ru (В.Л. Жбанова1); jakigor@rambler.ru (И.В. Якименко2).

ORCID: 0000-0001-7597-0675 (В.Л. Жбанова1); 0000-0002-1003-8403 (И.В. Якименко2).



© 2022 Copyright for this paper by its authors.

Use permitted under Creative Commons License Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).

desired color. This makes the equation more difficult to calculate. For the same cell, blue and red can only be found using two additional cells. This simplifies the equations by a factor of two, which means that the image processing speed also increases by a factor of 2. At the same time, the error in finding blue and red colors through two additional cells remains approximately the same as when finding green through 4 cells.

Keywords

Matrix photodetector, interpolation, color separation, multilayer detector, infrared range.

1. Введение

Оцифровка и обработка изображений на сегодняшний день является актуальной задачей, так как используется во многих направлениях науки и техники. Существует множество алгоритмов для повышения разрешения и масштабирования цифровых изображений. Простейшие методы, называемые линейными, осуществляют интерполяцию с помощью полифазной фильтрации. К этому классу относятся метод ближайшего соседа, билинейная и бикубическая интерполяции, фильтр Ланцоша и др. Типичные артефакты, вызываемые линейными методами, таковы: размытость деталей, эффект Гиббса (ложное оконтуривание) и зазубренность наклонных границ. Одновременно подавить все 3 артефакта линейными методами невозможно.

Ранее были разработаны шаблоны матричных фотоприемников с функцией работы в инфракрасном диапазоне [1, 2]. Суть предложенных шаблонов заключается в объединении возможностей шаблонов Байера и многослойных систем [3, 4]. Последние имеют высокие показатели шумов из-за большого количества слоев в одной ячейке, слои по типу Байера разнесены в пространстве и усложняют процесс интерполирования – нахождения основных цветов для каждой ячейки матричного фотоприемника. Предложенная модификация позволяет разнести двухслойные ячейки в пространстве, что позволит уменьшить шумы относительно многослойных матриц подобного типа, а также упростить методы интерполирования относительно шаблонов Байера.

Цель исследования – применение интерполирования к разработанным шаблонам двухслойных матриц. В рамках цели поставлены следующие задачи: исследование и применение линейного адаптивного методов интерполирования.

При совмещении слоев как показано на шаблоне МФПУ-1, на слои В, G и IR приходится по 50% чувствительной поверхности матрицы, а на составляющую R – 25%. Красной составляющей можно пренебречь, т.к. человеческий глаз менее чувствительный к этой области излучения. Зато такая комбинация позволяет применить отдельно слой IR, что позволит минимизировать шумы в этой области, и позволит сделать основной упор на инфракрасную область, а видимую использовать как вспомогательную.

Шаблон МФПУ-2 включает 100% покрытие светочувствительной области ячейками чувствительными к ИК-области (IR), при этом также 100% занимают слои видимого диапазона спектра: 50% ячейки захвата зеленой составляющей, 25% синей и 25% красной. Такая комбинация слоев позволит получать снимки сразу в четырех спектральных диапазонах, причем изображение ИК-снимка не будет требовать интерполяции.

Комбинация ячеек шаблона на основе МФПУ-3 позволяет распределить чувствительные слои таким образом, чтобы на каждый выбранный диапазон спектра приходилась равная доля поверхности матрицы: 50% на красную – R, 50% на зеленую – G, 50% на синюю составляющие – B, а также 50% на ИК-излучение – IR. Таким образом, достигается баланс каждого из четырех диапазонов спектра. При этом для получения полноценной картинки необходимо применять интерполяцию каждого пикселя.

Предложенные матрицы позволяют расширить функционал приемников излучения и получать мультиспектральное изображение за один снимок. Также с помощью ИК-изображения можно будет корректировать снимок в видимой области спектра.

На рисунках верхние слои изображены намного меньше нижних, хотя технологически это неверно. Подобное соотношение приведено только лишь для визуального представления принципа работы матрицы предложенного типа и иллюстрации того, что при исключении одного слоя, можно увеличить чувствительную площадь следующего. Для более подробного

анализа необходимо провести исследования по прохождению светового потока через матрицу с функцией регистрации ИК-излучения.

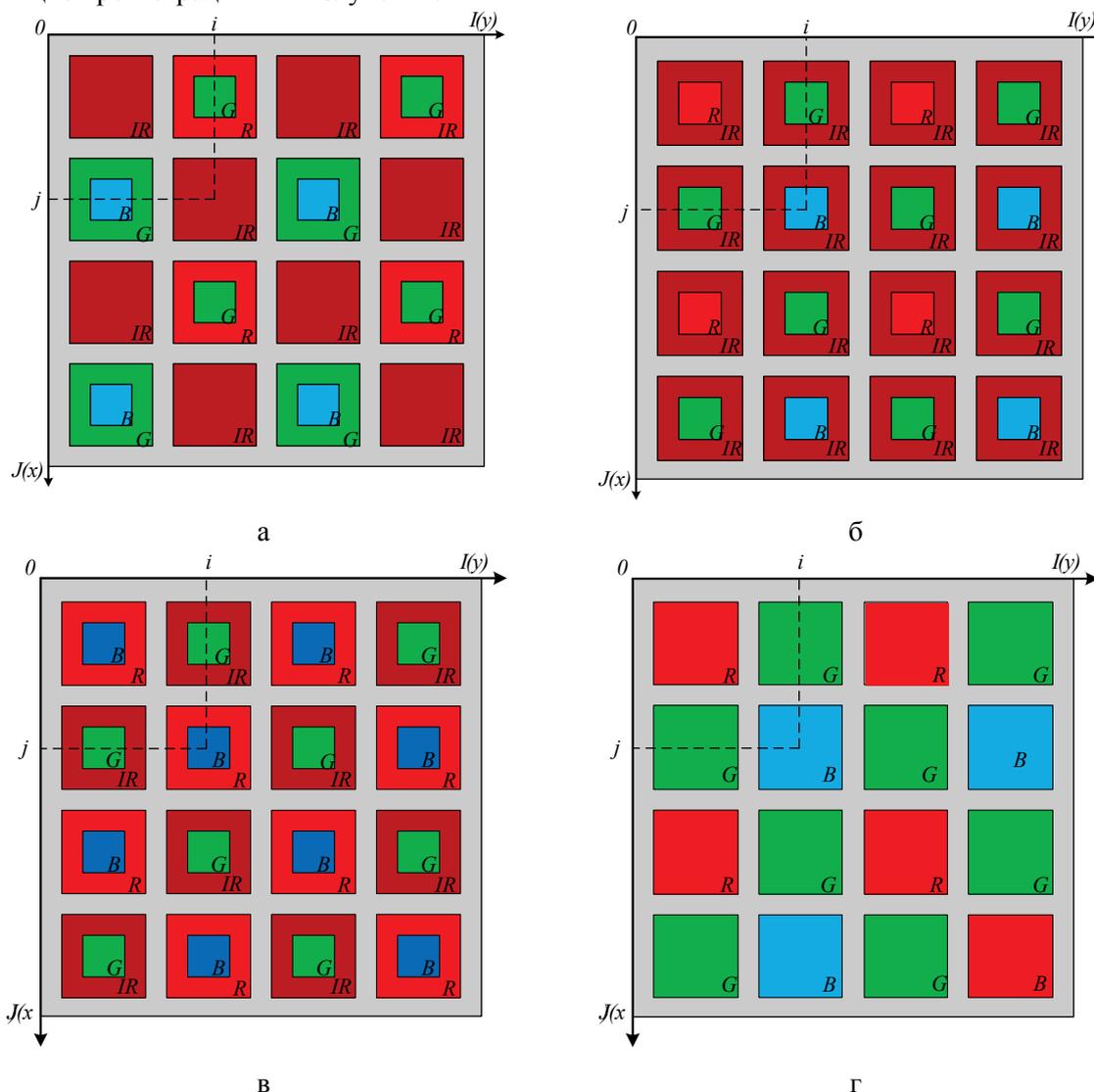


Рисунок 1 – Матрицы с различными шаблонами: а – МФПУ-1; б – МФПУ-2; в – МФПУ-3; г - Байера

2. Исследование шаблонов систем цветоделения

Задача интерполяции заключается в использовании имеющихся данных для получения ожидаемых значений в неизвестных точках [5-12].

Самый простой метод интерполирует каждый цвет самостоятельно, используя какой-то линейный алгоритм интерполяции (например, билинейная или бикубическая интерполяция). Это самый быстрый метод, который имеет самое низкое качество обработки изображений [5].

Адаптивные методы включают различные типы интерполяционных фильтров: пиксельная основа в зависимости от некоторых эвристических или математических моделей локальной области фотографии вокруг текущей точки.

К адаптивному методу можно отнести также крае-адаптивный метод. Результирующее качество интерполяции цветовых соотношений (или различий) сильно зависит от качества исходной интерполяции зеленого цвета. Желательно улучшить качество интерполяции зеленого цвета путем замены линейной интерполяции на краевую направленную интерполяцию.

Самый простой алгоритм краевой направленной интерполяции вычисляет вертикальный и горизонтальный градиенты, используя соседние интерполированные пиксели и предполагают,

что направление ребра вблизи этого пиксель соответствует направлению меньшего градиента. После при этом интерполированное значение пикселя вычисляется как среднее из двух значения пикселей в направлении края [12].

2.1. Применение линейной интерполяции

Рассмотрим интерполяцию линейным методом на примере многослойной матрицы с ячейками регистрации видимого и ближнего ИК диапазонов.

Матрица состоит из 4 повторяющихся ячеек в форме квадрата, т.е. если найти все цвета для этих 4 ячеек, то для остальных ячеек значения будут одинаковы. В шаблонах, представленных на рис. 1, каждую ячейку будем считать слева направо и сверху вниз.

Для 6 ячейки (расчет слева-направо и сверху-вниз) многослойной матрицы с ячейками регистрации видимого и ближнего ИК диапазонов необходимо найти зеленый, красный и синий цвета линейным методом (рис. 1, а):

$$R_{22} = \frac{R_{21} + R_{23}}{2},$$

$$B_{22} = \frac{B_{32} + B_{12}}{2},$$

$$G_{22} = \frac{G_{21} + G_{12} + G_{32} + G_{23}}{4}.$$

Для 7 ячейки необходимо найти красный цвет линейным методом:

$$R_{32} = \frac{R_{21} + R_{43} + R_{41} + R_{23}}{4}.$$

Для 10 ячейки необходимо найти синий цвет:

$$B_{32} = \frac{B_{21} + B_{43} + B_{23} + B_{41}}{4}.$$

Для 11 ячейки необходимо найти зеленый, красный и синий цвета:

$$R_{33} = \frac{R_{43} + R_{23}}{2},$$

$$B_{33} = \frac{B_{32} + B_{34}}{2},$$

$$G_{33} = \frac{G_{32} + G_{23} + G_{43} + G_{34}}{4}.$$

Рассмотрим также в качестве примера две матрицы:

1. Многослойная матрица с ячейками регистрации видимого и ближнего ИК диапазонов. С полной матрицей в ИК области.

2. Многослойная матрица с ячейками регистрации видимого и ближнего ИК диапазонов. Разнесение ИК ячеек в шахматном порядке.

Для 6 ячейки необходимо найти зеленый и красный цвета:

$$R_{22} = \frac{R_{11} + R_{33} + R_{31} + R_{13}}{4},$$

$$G_{22} = \frac{G_{21} + G_{12} + G_{32} + G_{23}}{4}.$$

Для 7 ячейки необходимо найти красный и синий цвета:

$$R_{32} = \frac{R_{31} + R_{33}}{2},$$

$$B_{32} = \frac{B_{22} + B_{42}}{2}.$$

Для 10 ячейки необходимо найти красный и синий цвета:

$$R_{23} = \frac{R_{13} + R_{33}}{2},$$

$$B_{23} = \frac{B_{22} + B_{24}}{2}.$$

Для 11 ячейки необходимо найти зеленый и синий цвета:

$$R_{33} = \frac{R_{22} + R_{44} + R_{42} + R_{24}}{4},$$

$$G_{33} = \frac{G_{32} + G_{23} + G_{43} + G_{34}}{4}.$$

Рассмотрим многослойную матрицу с ячейками регистрации видимого и ближнего ИК диапазонов. С полной матрицей в ИК области (рис.1, в).

Для 6 ячейки необходимо найти зеленый цвет:

$$G_{22} = \frac{G_{21} + G_{12} + G_{32} + G_{23}}{4}.$$

Для 7 ячейки необходимо найти красный и синий цвета:

$$R_{23} = \frac{R_{13} + R_{33}}{2},$$

$$B_{23} = \frac{B_{22} + B_{24}}{2}.$$

Линейный метод один из самых простых методов интерполяции. Но он имеет ряд недостатков. Большая погрешность в определении цветов. Получаются изображения с большой долей шума.

В зависимости от количества используемых переменных в уравнении, используя линейную интерполяцию, получаем более точные значения при использовании четырех известных значений, чем при использовании двух известных соседних ячеек.

2.2. Применение адаптивного метода

На примере данных трех матриц рассмотрим применение адаптивного метода интерполяции.

Для МФПУ-1 уравнения примут вид:

Для 6 ячейки необходимо найти зеленый, красный и синий цвета. Любой из этих цветов можно найти, зная два других. Найдем для этой ячейки зеленый цвет адаптивным методом, для этого найдем все D , E для ячеек которые мы используем:

$$D_x(G_{22}) = \frac{G_{12} - G_{32}}{2},$$

$$D_y(G_{22}) = \frac{G_{21} - G_{23}}{2},$$

$$D_x(B_{22}) = \frac{B_{12} - B_{32}}{2},$$

$$D_y(R_{22}) = \frac{R_{21} - R_{32}}{2},$$

$$E_{22} = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(G_{32}) + D^2(G_{22})}},$$

$$E_{21} = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(G_{32}) + D^2(G_{21})}},$$

$$E_{12} = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(G_{33}) + D^2(G_{12})}},$$

$$E_{32} = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(G_{23}) + D^2(G_{32})}},$$

$$E_{23} = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(G_{32}) + D^2(G_{23})}}.$$

Определим G :

$$G_{22} = \frac{G_{21}E_{21} + G_{12}E_{12} + G_{32}E_{32} + G_{23}E_{23}}{E_{21} + E_{12} + E_{32} + E_{23}}.$$

Найдем для этой ячейки B :

$$B_{22} = \frac{B_{12}E_{12} + B_{32}E_{32}}{E_{12} + E_{32}}.$$

Аналогично как и синий найдем красный:

$$R_{22} = \frac{B_{21}E_{21} + B_{23}E_{23}}{E_{21} + E_{23}}.$$

Для 7 ячейки необходимо найти красный цвет и ИК излучение. Но красный цвет адаптивным методом мы найти не можем.

Приступаем к поиску IR адаптивным методом:

$$IR_{23} = \frac{IR_{13} + IR_{22} + IR_{24} + IR_{33}}{4}.$$

Для 10 ячейки необходимо найти синий цвет и ИК излучение, но синий цвет для данной ячейки адаптивным методом найти нельзя, не хватает данных.

Найдем IR для 10 ячейки также как и для 7 ячейки:

$$IR_{32} = \frac{IR_{22} + IR_{13} + IR_{33} + IR_{24}}{4}.$$

Для 11 ячейки необходимо найти зеленый, красный и синий цвета:

$$D_x(G_{33}) = \frac{G_{23} - G_{43}}{2},$$

$$D_y(G_{33}) = \frac{G_{32} - G_{34}}{2},$$

$$D_x(R_{33}) = \frac{R_{23} - R_{43}}{2},$$

$$D_y(B_{33}) = \frac{B_{32} - B_{34}}{2},$$

$$E_{33} = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(G_{32}) + D^2(G_{33})}},$$

$$E_{32} = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(G_{23}) + D^2(G_{32})}},$$

$$E_{23} = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(G_{32}) + D^2(G_{23})}},$$

$$E_{43} = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(G_{32}) + D^2(G_{43})}},$$

$$E_{34} = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(G_{23}) + D^2(G_{34})}},$$

Определим G :

$$G_{33} = \frac{G_{32}E_{32} + G_{23}E_{23} + G_{43}E_{43} + G_{34}E_{34}}{E_{32} + E_{23} + E_{43} + E_{34}}.$$

Найдем для этой ячейки B :

$$B_{33} = \frac{B_{32}E_{32} + B_{34}E_{34}}{E_{32} + E_{34}}.$$

Аналогично, как и синий найдем красный:

$$R_{33} = \frac{B_{23}E_{23} + B_{43}E_{43}}{E_{23} + E_{43}}.$$

Адаптивный метод в отличие от линейного имеет более сложные уравнения, но и качество получаемого изображения во много раз лучше.

Для МФПУ-2 применим адаптивный метод. Для 6 ячейки использовать адаптивный метод нельзя. Для 7 ячейки необходимо найти красный и синий цвета, сделать мы это можем двумя способами.

$$D_x(B_{32}) = \frac{B_{22} - B_{42}}{2},$$

$$D_y(R_{32}) = \frac{R_{31} - R_{33}}{2},$$

$$E_{32} = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(G_{23}) + D^2(G_{32})}},$$

$$E_{31} = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(G_{32}) + D^2(G_{31})}},$$

$$E_{22} = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(G_{32}) + D^2(G_{22})}},$$

$$E_{42} = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(G_{32}) + D^2(G_{42})}},$$

$$E_{33} = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(G_{32}) + D^2(G_{33})}}.$$

После того как нашли E , найдем теперь R и B :

$$R_{32} = \frac{R_{31} + R_{33}}{E_{31} + E_{33}},$$

$$B_{32} = \frac{B_{22} + B_{42}}{E_{22} + E_{42}}.$$

Для 10 ячейки необходимо найти красный и синий цвета:

$$D_x(R_{23}) = \frac{R_{13} - R_{33}}{2},$$

$$D_y(B_{23}) = \frac{R_{22} - R_{24}}{2},$$

$$E_{23} = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(B_{22}) + D^2(B_{23})}},$$

$$E_{22} = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(B_{23}) + D^2(B_{22})}},$$

$$E_{24} = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(G_{23}) + D^2(G_{24})}},$$

$$E_{23} = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(R_{13}) + D^2(R_{23})}},$$

$$E_{13} = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(R_{23}) + D^2(R_{13})}},$$

$$E_{33} = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(R_{23}) + D^2(R_{33})}}.$$

После того как нашли все E , найдем теперь R и B :

$$R_{23} = \frac{R_{13} + R_{33}}{E_{13} + E_{33}},$$

$$B_{23} = \frac{B_{22} + B_{24}}{E_{22} + E_{24}}.$$

Для 11 ячейки адаптивный метод не подходит.

Рассмотрим адаптивный метод на примере МФПУ-3. Для 6 ячейки необходимо найти зеленый цвет и ИК излучение:

Найдем D и E с помощью разных цветов:

$$D_x(G_{22}) = \frac{G_{12} - G_{32}}{2},$$

$$D_y(G_{22}) = \frac{G_{21} - G_{23}}{2}.$$

Остальные расчеты примут следующий вид: $D_{xd}(B_{22}) = B_{22}$, $D_{yd}(B_{22}) = B_{22}$, $D_{xd}(R_{22}) = R_{22}$, $D_{yd}(R_{22}) = R_{22}$,

$$E_{22} = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(G_{32}) + D^2(G_{22})}}.$$

Остальные расчеты примут следующий вид: $E_{21} = G_{21}$, $E_{12} = G_{12}$, $E_{32} = G_{32}$, $E_{23} = G_{23}$, $E_{11} = B_{11}$, $E_{33} = B_{33}$, $E_{31} = B_{31}$, $E_{13} = B_{13}$.

Составим уравнение для зеленого цвета крае-адаптивным методом:

$$G_{22} = \frac{G_{21}E_{21} + G_{12}E_{12} + G_{32}E_{32} + G_{23}E_{23}}{E_{21} + E_{12} + E_{32} + E_{23}}.$$

Определим IR :

$$IR_{22} = \frac{IR_{21}E_{21} + IR_{12}E_{12} + IR_{32}E_{32} + IR_{23}E_{23}}{E_{21} + E_{12} + E_{32} + E_{23}}.$$

Для 7 ячейки необходимо найти красный и синий цвета:

Найдем D и E с помощью разных цветов:

$$D_x(B_{32}) = \frac{B_{22} - B_{42}}{2},$$

$$D_y(B_{32}) = \frac{B_{31} - B_{33}}{2},$$

$$D_x(R_{32}) = \frac{R_{22} - R_{42}}{2},$$

$$D_y(R_{32}) = \frac{R_{31} - R_{33}}{2},$$

$$D_{xd}(G_{32}) = G_{32},$$

$$D_{yd}(G_{32}) = G_{32}.$$

Остальные расчеты примут следующий вид: $E_{32} = G_{32}$, $E_{21} = G_{21}$, $E_{43} = G_{43}$, $E_{41} = G_{41}$, $E_{23} = G_{23}$, $E_{22} = B_{22}$, $E_{31} = B_{31}$, $E_{42} = B_{42}$, $E_{33} = B_{33}$.

Составим уравнение для R и B крае-адаптивным методом:

$$R_{32} = \frac{R_{31}E_{31} + R_{22}E_{22} + R_{42}E_{42} + R_{33}E_{33}}{E_{31} + E_{22} + E_{42} + E_{33}},$$

$$B_{32} = \frac{B_{31}E_{31} + B_{22}E_{22} + B_{42}E_{42} + B_{33}E_{33}}{E_{31} + E_{22} + E_{42} + E_{33}}.$$

Для 7 ячейки лучше воспользоваться крае-адаптивным методом.

На примере ячейки 6 МФПУ-1 проанализируем применение адаптивного метода для нахождения неизвестных цветов ячейки. При нахождении значения зеленого цвета используется 4 соседние ячейки, что делает уравнение более сложным в расчете. Для этой же ячейки синий и красный цвет найти можно только с использованием двух дополнительных ячеек, т.е. алгоритм аналогичен системе Байера (рис. 1, г) для слоя IR. Но для ячеек с совмещенными слоями V+G и G+R алгоритм упрощается в два раза², а значит и скорость обработки изображения в видимой области спектра должна увеличиться [6].

3. Заключение

На примере трех многослойных матриц с ячейками регистрации видимого и ближнего ИК диапазонов применили три разных метода интерполяции. В заключение можно сказать: в зависимости от количества используемых переменных в уравнении, применяя линейную интерполяцию, получаем более точные значения при использовании четырех известных значений, чем при использовании двух известных соседних ячеек, но разница в погрешности небольшая. В стандартном адаптивном методе используют 4 соседние ячейки для нахождения необходимого цвета. Это делает уравнение более сложным в расчете. Для этой же ячейки синий и красный цвет найти можно с использованием только двух дополнительных ячеек. Это упрощает уравнения, а значит увеличивает скорость обработки изображения. При этом погрешность нахождения синего и красного цвета через две дополнительные ячейки остается примерно такой, как и при нахождении зеленого цвета через 4 ячейки. Из полученных алгоритмов можно сделать вывод, что используя такие измененные методы интерполяции можно ускорить процесс обработки изображения примерно в 2 раза. Также количество неизвестных в этих уравнениях меньше чем в стандартных [11, 12], что упрощает программу по обработке изображения в среднем примерно в 1,5 раза.

4. Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-00012, <https://rscf.ru/project/21-79-00012/> (The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 21-79-00012, <https://rscf.ru/en/project/21-79-00012/>).

5. Список источников

- [1] Zhbanova, V.L., Parvulyusov, Yu.B., Solomatin, V.A. Multispectral matrix silicon photodetectors with the IR range registration // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. 1679(2). 022039. DOI: 10.1088/1742-6596/1679/2/022039.
- [2] Solomatin, V.A., Zhbanova, V.L. Influence of photodetector-array patterns on spatial-frequency response // *Journal of Optical Technology (A Translation of Opticheskii Zhurnal)*. 2021. Vol. 88(12). P. 722-728. DOI: 10.1364/JOT.88.000722.

² <https://audio.rightmark.org/lukin/pub/graphicon04demosaiing.pdf>

- [3] Жбанова В.Л., Якименко И.В. Заявка на полезную модель «Мультиспектральный матричный фотоприемник», № 2022108490 от 30.03.2022.
- [4] U.S. Patent 5965875. Merrill R.B. Color Separation In An Active Pixel Pit Imaging Array Using A Triple-Well Structure. 1999.
- [5] Richard Lyon, Paul M. Hubel. Eyeing the Camera: into the Next Century // Color Imaging Conference. 2002. P. 349-355.
- [6] Rajeev Ramanath, Wesley E. Snyder, Griff L. Bilbro. Demosaicking methods for Bayer color arrays [Электронный ресурс] // Journal of Electronic imaging. Vol.11. №. 3. 2002. P. 306-315.
- [7] Chervyakov N. I. Two methods of adaptive median filtering of pulse noise in images / N. I. Chervyakov, P. A. Lyakhov, A. R. Ozaev // Computer optics. 2018. Vol. 42. №. 4. P. 667-678. DOI: 10.18287 / 2412-6179-2018-42-4-667-678.
- [8] Li J. A solution method for image distortion correction model based on bilinear interpolation / J. Li J. Su, X. Zeng // Computer Optics. 2019. Vol. 43. Issue 1. P. 99-104. DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-1-99-104.
- [9] U.S. Patent 5231281. Dubruco Denyse. Super-CCD with default distribution and its fabrication. 1993.
- [10] U.S. Patent 5382976. Hibbard R.H. Apparatus and method for adaptively interpolating a full color image utilizing luminance gradients. 1995.
- [11] U.S. Patent 5805217. Ning A. Lu, Zhiwu Lu. Method and system for interpolating missing picture elements in a single color component array obtained from a single color sensor. 1998.
- [12] Zapryanov G., Nikolova I. Comparative Study of Demosaicing Algorithms for Bayer and Pseudo-Random Bayer Color Filter Arrays // International Scientific Conference Computer Science'2008. 2008. P. 133-139.