

Математическое моделирование функций передачи модуляции матричных фотоприемников при интерполяции цвета

В. Л. Жбанова

Филиал ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ» в г. Смоленске
vera-zhbanova@yandex.ru

Аннотация. В работе рассмотрены вопросы математического моделирования и программного обеспечения методов нахождения функций передачи модуляции при интерполяции цвета матричных фотоприемников. Обоснован выбор программного обеспечения. Представлены шаблоны новых систем цветоделения на основе колориметрической системы МКО XYZ 1931 г. Обосновано внедрение новых систем в цифровые устройства захвата изображений. Рассматривается влияние интерполяции цвета на пространственно-частотные свойства матричного приемника с новыми шаблонами. Приведены результаты инженерного расчета при исследовании.

Ключевые слова: математическое моделирование; программное обеспечение; шаблон; матрица; интерполяция; функции передачи модуляции; оптическая передаточная функция

I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время существуют многочисленные системы цветоделения цифровых фотокамер (ЦФК), среди которых наибольшую популярность получили методы с интерполяцией цвета [1, 2]. Каждая ячейка такой матрицы регистрирует определенный основной цвет: красный, зеленый или синий. Они являются базовыми, все остальные тона воспринимаются как их смешение в определенной пропорции. Функции соответствия цветов – это значения каждой первичной составляющей света, которые должны присутствовать, чтобы человек со средним зрением мог воспринимать все цвета видимого спектра. Этим трём первичным составляющим были поставлены в соответствие координаты X , Y и Z . Поэтому первоначально с матрицы получается изображение как разноцветная мозаика. Чтобы получить полноцветное изображение, необходимо выполнить алгоритм интерполяции. При интерполяции цвета систем с пространственным размещением светофильтров каждому элементу приемника излучения присваиваются все три значения основных цветов, из них одно действительное, соответствующее цвету светофильтра, а два являются результатом интерполяции, поэтому происходит размытие

изображения, то есть ухудшение резкостных свойств.

Существуют две категории алгоритма интерполяции: адаптивные и неадаптивные [3-9]. Адаптивные интерполяторы могут производить несвойственные исходному изображению искажения и погрешности. Вычисления при адаптивной интерполяции цвета оказываются гораздо более сложными, а для их выполнения требуются высокопроизводительные микропроцессоры и большие объёмы памяти. Для алгоритмов интерполяции разрабатываются специальные объёмные программы. Чем больше шаблон системы цветоделения, тем сложнее будет алгоритм вычислений и тем больше риск размытия изображений. Именно поэтому следует оценивать шаблон цветоделения матричного фотоприемника по функциям передачи модуляции, описывающего пространственно-частотные свойства только алгоритма интерполяции цвета как одного из оптических передаточных звеньев, влияющих на разрешающую способность цифровой системы.

Цель работы – исследовать на основе математического моделирования новые разработанные шаблоны цветоделения. В рамках поставленной цели были выполнены следующие задачи: выбор программного обеспечения, анализ новых шаблонов, описание и исследование оптической передаточной функции.

II. ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Предлагается исследовать оптические передаточные функции разработанного матричного фотоприемника с новой системой цветоделения, представленного на рис. 1.

Спектральные чувствительности фотоприемников соответствуют кривым сложения колориметрической системы МКО XYZ 1931 г.: $x(\lambda)$, $y(\lambda)$, $z(\lambda)$, представленные на рис. 2. Кривая $x(\lambda)$ имеет сложную форму: два максимума [10].

XYZ МКО – линейная трехкомпонентная цветовая модель, основанная на результатах измерения характеристик человеческого глаза и является универсальным цветовым пространством (*universal color space*), в котором был представлен диапазон видимых цветов, характерный для среднестатистического человека.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-37-00176.

Системе XYZ присуще свойство – положительная определённость, т.е. любой физически осязуемый цвет представляется в системе XYZ только положительными величинами. Хотя не всем точкам в пространстве XYZ соответствуют реальные цвета в силу неортогональности функций соответствия цветов.

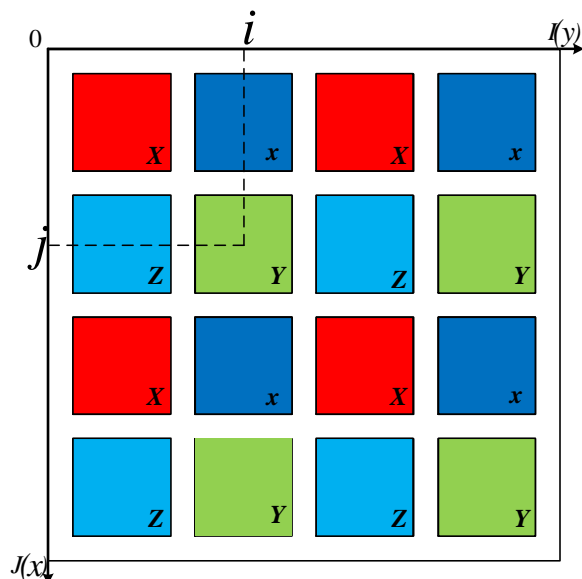


Рис. 1. Шаблон системы цветоделения XxYZ

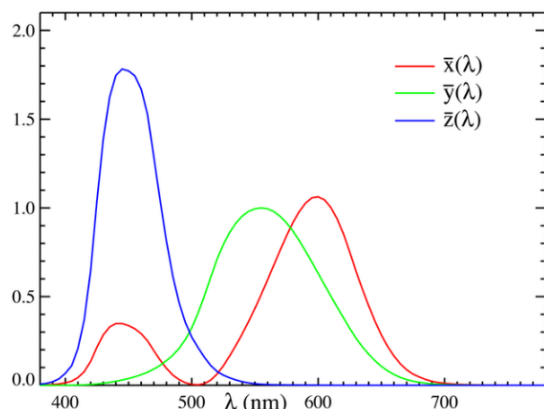


Рис. 2. Характеристики шаблона на основе колориметрической системы МКО XYZ 1931 г.

Было принято решение одну характеристику «разбить» на две отдельные для двух светофильтров, из которых один корректируется под коротковолновую ветвь кривой компоненты $x(\lambda)$, где $\lambda \leq 505$ нм, а второй X – под длинноволновую ветвь, где $\lambda \geq 505$ нм. Тогда получим систему цветоделения с набором светофильтров XxYZ. Небольшую ветвь кривой $x(\lambda)$ можно использовать как дополнительную информацию к кривой $z(\lambda)$ о синей составляющей спектра при низкой освещенности, как это делается в технологии, представленной в источнике [11]. В матрице *Super CCD* чувствительные элементы сгруппированы попарно: S-элементы при освещении насыщаются быстро, получая информацию о цвете точки. В это же время R-элементы насыщаются гораздо медленнее, отчего они лучше определяют освещенность.

Аналогично можно применить x и Z ячейки для определения насыщенности по синим оттенкам. Из-за достаточно большой спектральной характеристики ячейка Z будет наполняться быстрее в хорошо освещаемых сценах, в то время как ячейка x будет хорошо работать с темными мало насыщенными сценами и объектами. Так эти ячейки будут дополнять друг друга при оцифровке снимка. Также в дальнейшем можно применить технологию *Dual Capture Technology*.

Под эту систему было разработано три шаблона систем цветоделения. Рассматривается влияние интерполяции цвета на пространственно-частотные свойства матричного фотоприемника будет в рамках первой системы, т.к. остальные по функциям будут схожи.

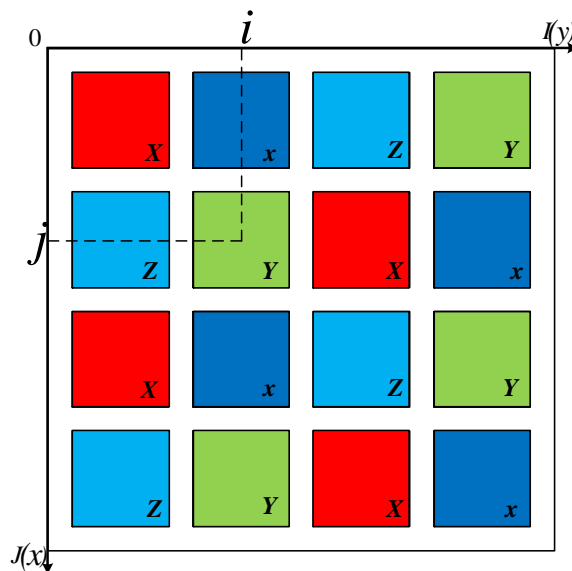


Рис. 3. Шаблон системы цветоделения XxYZ со сдвигом

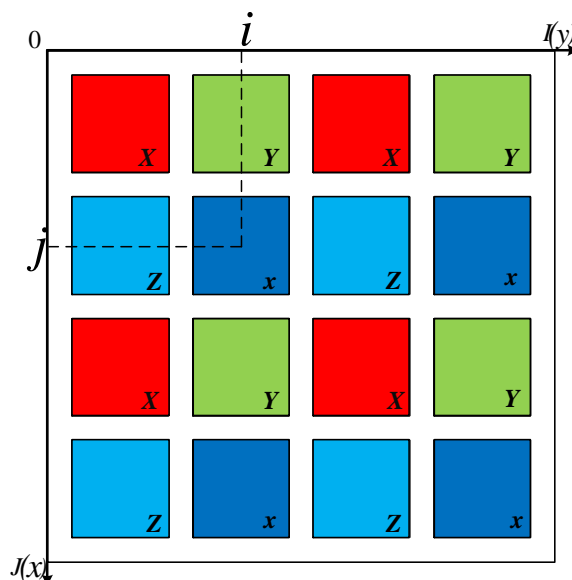


Рис. 4. Шаблон системы цветоделения XYxZ

Автором представлен другой шаблон системы XxYZ, созданный сдвигом исходного шаблона на одну ячейку

вниз (см. рис. 3). Такая конфигурация позволит избавиться от дефектов в изображении вызванных диагональными прямыми – алиасинга. В шаблоне на рис. 1 могут наблюдаться диагональные линии при использовании ячеек x как вспомогательных для ячеек Z , а также могут проявиться горизонтальные линии при применении ячейки x как вспомогательной к ячейке X , при работе с системой XYZ МКО 1931 г. Поэтому матрица с предложенным шаблоном может быть полезной при захвате изображений с строгими прямыми и диагональными линиями, которые часто встречаются при съемке промышленных пейзажей, города, автострад и других объектов, созданных руками человека.

Также предлагается шаблон с комбинацией ячеек $XYxZ$. Отличие от первого шаблона только в том, что могут наблюдаться диагональные линии при использовании ячеек x как вспомогательных для ячеек X , а горизонтальные линии при применении ячейки x как вспомогательной к ячейке Z , при работе с системой XYZ МКО 1931 г. Этот шаблон хорошо применять при съемке объектов живой природы, где строгие прямые линии встречаются крайне редко (за исключением горизонта).

III. ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ПЕРЕДАТОЧНЫХ ФУНКЦИЙ

На основе анализа различных языков программирования и их достоинств и недостатков, была выбрана программа *Mathcad*, как наиболее удобный, понятный и простой в обучении программный пакет. Основным преимуществом пакета является естественный математический язык, на котором формируются решаемые задачи. Программа обладает широкими графическими возможностями, расширяемыми от версии к версии. Практическое применение пакета существенно повышает эффективность интеллектуального труда. Внося изменения, пользователь немедленно видит результаты, в любой момент и может внести изменения. Также программа имеет дружелюбный и понятный интерфейс.

Для исследования влияния интерполяции цвета на пространственно-частотные свойства матричного фотоприемника был выбран алгоритм линейной интерполяции. При проведении интерполяции цвета, каждому элементу приемника присваивается значение всех основных цветов. Один основной цвет, считается «истинным», который регистрирует сама ячейка, оставшиеся цвета – «вычисленными», т.к. находятся по усредненному значению с соседних ячеек. В системе $XxYZ$ алгоритм интерполяции цвета для каждого элемента будет производиться аналогично расчетам приемников с координатами (i, j) , $(i+1, j)$, $(i, j+1)$ и $(i+1, j+1)$. Расчет и построение графиков будет производиться в программе *Mathcad*.

Для элемента приемника излучения с координатами (i, j) выходной сигнал будет равен:

$$X(i, j) = \frac{1}{4} [X(i-1, j-1) + X(i+1, j-1) + X(i+1, j+1) + X(i-1, j+1)];$$

$$x(i, j) = \frac{1}{2} [x(i, j-1) + x(i, j+1)];$$

$$Y(i, j) = Y(i, j);$$

$$Z(i, j) = \frac{1}{2} [Z(i-1, j) + Z(i+1, j)].$$

Для элемента приемника излучения с координатами $(i+1, j)$ выходной сигнал будет равен:

$$X(i+1, j) = \frac{1}{2} [X(i+1, j-1) + X(i+1, j+1)];$$

$$x(i+1, j) = \frac{1}{4} [x(i, j-1) + x(i+2, j-1) + x(i, j+1) + x(i+2, j+1)];$$

$$Y(i+1, j) = \frac{1}{2} [Y(i, j) + Y(i+2, j)];$$

$$Z(i+1, j) = Z(i+1, j).$$

Для элемента приемника излучения с координатами $(i, j+1)$ выходной сигнал будет равен:

$$X(i, j+1) = \frac{1}{2} [X(i-1, j+1) + X(i+1, j+1)];$$

$$x(i, j+1) = x(i, j+1);$$

$$Y(i, j+1) = \frac{1}{2} [Y(i, j) + Y(i, j+2)];$$

$$Z(i, j+1) = \frac{1}{4} [Z(i-1, j) + Z(i+1, j) + Z(i-1, j+2) + Z(i+1, j+2)].$$

Для элемента приемника излучения с координатами $(i+1, j+1)$ выходной сигнал будет равен:

$$X(i+1, j+1) = X(i+1, j+1);$$

$$x(i+1, j+1) = \frac{1}{2} [x(i, j+1) + x(i+2, j+1)];$$

$$Y(i+1, j+1) = \frac{1}{4} [Y(i, j) + Y(i+2, j) + Y(i, j+2) + Y(i+2, j+2)];$$

$$Z(i+1, j+1) = \frac{1}{2} [Z(i+1, j) + Z(i+1, j+2)].$$

В пространственно-частотной области описывается оптическая передаточная функция (ОПФ), которая в этом случае обусловлена сдвигами сигнала по элементам приемника излучения. При нахождении оптических передаточных функций примем для каждого цвета, что изображения бесконечны, одного цвета и при интерполяции создается изображение, каждый элемент которого является результатом интерполяции.

ОПФ для компоненты X примет вид:

$$W_{i,j}^X(\Omega_x; \Omega_y) = \cos(p_x \Omega_x) \cdot \cos(p_y \Omega_y);$$

$$W_{i,j+1}^X(\Omega_x; \Omega_y) = \cos(p_x \Omega_x);$$

$$W_{i+1,j}^X(\Omega_x; \Omega_y) = \cos(p_y \Omega_y);$$

$$W_{i+1,j+1}^X(\Omega_x; \Omega_y) = 1.$$

ОПФ для компоненты x примет вид:

$$W_{i,j}^x(\Omega_x; \Omega_y) = \cos(p_y \Omega_y);$$

$$W_{i,j+1}^x(\Omega_x; \Omega_y) = 1;$$

$$W_{i+1,j}^x(\Omega_x; \Omega_y) = \cos(p_x \Omega_x) \cdot \cos(p_y \Omega_y);$$

$$W_{i+1,j+1}^x(\Omega_x; \Omega_y) = \cos(p_x \Omega_x).$$

ОПФ для компоненты Y примет вид:

$$\begin{aligned}
W_{i,j}^Y(\Omega_x;\Omega_y) &= 1; \\
W_{i,j+1}^Y(\Omega_x;\Omega_y) &= \cos(p_y\Omega_y); \\
W_{i+1,j}^Y(\Omega_x;\Omega_y) &= \cos(p_x\Omega_x); \\
W_{i+1,j+1}^Y(\Omega_x;\Omega_y) &= \cos(p_x\Omega_x)\cos(p_y\Omega_y).
\end{aligned}$$

ОПФ для компоненты Z примет вид:

$$\begin{aligned}
W_{i,j}^Z(\Omega_x;\Omega_y) &= \cos(p_x\Omega_x); \\
W_{i,j+1}^Z(\Omega_x;\Omega_y) &= \cos(p_x\Omega_x)\cos(p_y\Omega_y); \\
W_{i+1,j}^Z(\Omega_x;\Omega_y) &= 1; \\
W_{i+1,j+1}^Z(\Omega_x;\Omega_y) &= \cos(p_y\Omega_y).
\end{aligned}$$

Примем за оптические передаточные функции каждого основного цвета среднее значение оптических передаточных функций, описанных выше. Таким образом, одномерные ФПМ интерполяции цвета для каждого основного цвета, учитывающие влияние алгоритма интерполяции цвета, системы $XxYZ$, можно описать следующим выражением:

$$T_{XxYZ}^X(N) = T_{XxYZ}^x(N) = T_{XxYZ}^Y(N) = T_{XxYZ}^Z(N) = 0,5 + 0,5\cos(2\pi pN),$$

где $T_{XxYZ}^X(N)$ – ФПМ интерполяции компоненты X; $T_{XxYZ}^x(N)$ – ФПМ интерполяции компоненты x; $T_{XxYZ}^Y(N)$ – ФПМ интерполяции компоненты Y; $T_{XxYZ}^Z(N)$ – ФПМ интерполяции компоненты Z; N – пространственная частота, мм^{-1} ; p – размер элемента приемника излучения, мм (6,424 $\mu\text{м}$).

На рис. 5 представлены графики ФПМ интерполяции цвета предложенной системы $XxYZ$ рассчитанные в программе *Mathcad*.

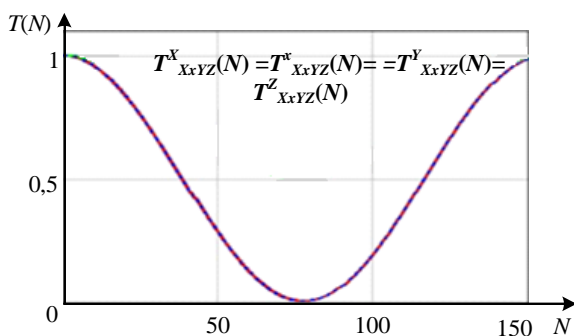


Рис. 5. Кривые функции передачи модуляции шаблона $XxYZ$

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ

В целом рассчитанные ОПФ систем для многоэлементных матричных фотоприемников удовлетворительны. Функции передачи модуляции системы $XxYZ$ имеют колебательный характер и наблюдается небольшой спад ФПМ каналов всех трех основных цветов, как это наблюдается и в стандартных шаблонах Байера [12]. Чтобы получить идеальные характеристики ФПМ следует применять новые системы многослойного типа [13], которые дороги в производстве и

имеют высокий уровень шумов. Для таких систем требуются высокопроизводительные микропроцессоры и большие объемы памяти.

Основное достоинство разработанного шаблона $XxYZ$ это спектральные характеристики светофильтров системы цветоделения, которые основаны на кривых сложения колориметрической системы МКО XYZ 1931 г. Применение характеристик данной системы позволяет расширить цветовой охват цифровых систем, в сравнении со стандартными цветовыми пространствами RGB. Таким образом, в предлагаемых системах цветоделения $XxYZ$ пространственно-частотные характеристики показывают достаточно приемлемый результат.

В дальнейшем возможно исследование функций передачи модуляции интерполяции цвета систем цветоделения $XxYZ$ со сдвигом вверх на один пиксель, и шаблона $XYxZ$ с чередованием светофильтров с характеристиками кривой $x(\lambda)$. Предлагается применить бикубическую интерполяцию и сравнить результаты исследований. Работа может быть интересна специалистам в области оптико-электронных приборов и цифровым устройствам, в частности.

ВЫРАЖЕНИЕ ПРИЗНАТЕЛЬНОСТИ

Выражаю благодарность за помощь канд. техн. наук, профессору Парвулюсову Юрию Борисовичу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Жбанова В.Л., Мартыненко Г.В. Оптико-электронные системы захвата и обработки изображений: учебное пособие. Смоленск: РИО филиала МЭИ в г. Смоленске, 2014. – 168 с.
- [2] U.S. Patent 3971065 A. Bayer B.E. color imaging array. July 20, 1976.
- [3] Patent USA № 7 844 127 B2 / James E. Adams, Jr., John F. Hamilton, Jr., Michele O'Brien. Edge mapping using panchromatic pixels. Nov. 03, 2010.
- [4] Patent USA № 7830430 B1 / Adams Jr., James E. et al. Interpolation of panchromatic and color pixels. Nov. 09, 2010.
- [5] Patent USA № 7708686 B2 / Kartik Venkataraman. Color filter imaging array and method of formation. May 4, 2010.
- [6] Patent USA № 6091850 / A. Ostrovsky A. Method of compressing and decompressing graphic images. June 18, 2000.
- [7] Patent USA № 5805217 / A. Ning Lu, Zhiwu Lu. Method and system for interpolating missing picture elements in a single color component array obtained from a single color sensor. Sent. 8, 1998.
- [8] Ramanath R., Snyder W., Bilbro G. Demosaicking methods for Bayer color arrays [Электронный ресурс] // Journal of Electronic Imaging 11(3), North Carolina State University, July 2002, pp. 306-315. URL: <http://www.ece.ncsu.edu/imaging/Publications/2002/demosaicking-JEI-02.pdf> (дата обращения: 05.11.2010).
- [9] Kimmel R. Demosaicing: image reconstruction from CCD samples [Электронный ресурс] // IEEE Trans. Image Processing, vol.8, no. 9, 1999, pp. 1221-1228. URL: http://www.cs.technion.ac.il/~ron/PAPERS/Kim_TIP1999.pdf (дата обращения: 21.11.2010).
- [10] Джадд Д., Вышецкий Г. Цвет в науке и технике. М.: Мир, 1978. 592 с.
- [11] Patent USA № 5231281 / Dubruco, Denyse. Super-CCD with default distribution and its fabrication. June 27, 1993.
- [12] Тихоничев В.В., Данилин А.А. Влияние интерполяции цвета на пространственно-частотные свойства матричного приемника оптического излучения [Электронный ресурс] // Исследовано в России: электронный журнал, 2009. URL: <http://zhurnal.aep.relarn.ru/articles/2009/101.pdf> (дата обращения: 09.02.2009).
- [13] Жбанова В.Л., Парвулюсов Ю.Б. Моделирование хода лучей в матричном фотоприемнике с многослойной структурой. Известия высших учебных заведений // Геодезия и аэрофотосъемка. Геодезическое приборостроение. М. №4, 2014, С.108-113.