

Влияние структуры массивов цветофильтров на характеристики устройств формирования сигналов цветного изображения

Романов С.Г., Поташников А.М.

Аннотация. Основными характеристиками устройств формирования сигналов цветного изображения являются светочувствительность, количество передаваемых градаций и точность цветопередачи. Эти характеристики зависят как от технических особенностей устройства, так и от методов формирования изображения применяемых в них. В твердотельных матричных преобразователях свет-сигнал наиболее влияющим на характеристики устройства фактором является используемая структура массива цветных фильтров. В зависимости от заданных требований, предъявляемых к устройству, необходимо изменять или дополнять эту структуру, и тем самым влиять на качественные показатели получаемого изображения. Однако при этом необходимо учитывать множество психофизических особенностей зрительной системы человека таких, как спектральная чувствительность глаза, контрастные характеристики зрительной системы человека, цветовой охват зрительной системы.

В современных устройствах формирования цветных цифровых изображений таких, как цифровые видеокамеры, фотоаппараты и др., для формирования изображений используются матричные твердотельные преобразователи свет-сигнал (ПСС). Считывающие элементы таких устройств обычно представляют собой многопиксельные массивы из приборов с зарядовой связью (ПЗС) или комплементарных метал-диэлектрик-полупроводник транзисторов (КМОП). Оба типа таких сенсоров обладают определенными спектральными характеристиками как в области видимых человеческому глазу частот электромагнитных волн так и невидимых. На рис. 1 а приведена характеристика спектральной чувствительности одного из таких сенсоров, а на рис. 1 б кривая спектральной чувствительности человеческого глаза в условиях дневной освещенности. Для того чтобы максимально приблизить характеристики датчиков устройств к характеристикам человеческого глаза, необходимо ограничивать воздействие на них электромагнитных волн выходящих за спектр видимых частот, путем установки специальных фильтров перед ПСС. Значение накопленной световой энергии падающей на поверхность датчика ПСС в каждом пикселе массива датчиков, определяется путем считывания значения заряда образовавшегося в каждой ячейке из-за протекания в ней фотоэффекта. В результате, на выходе каждой ячейки матрицы ПСС получается значение напряжения, показывающее количественную меру энергии накопленной в этой ячейке за время экспонирования кадра.

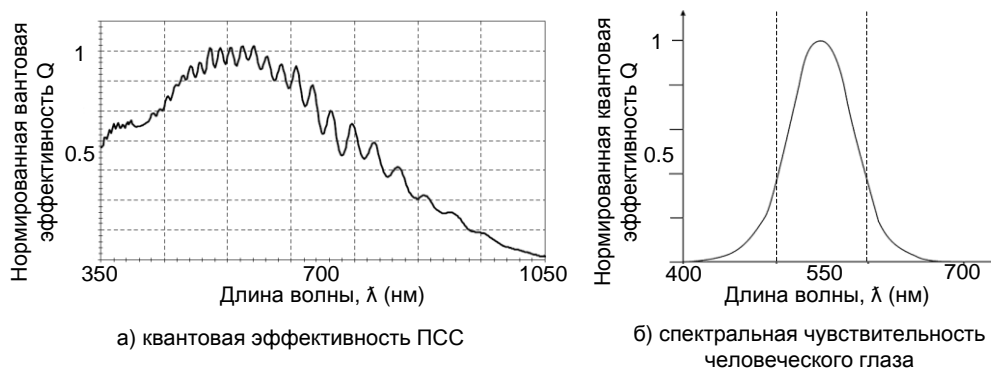


Рисунок 1. Спектральная чувствительность глаза и ПСС.

Любое цветное изображение в общем случае характеризуется тремя основными параметрами: светлотой (яркостью), цветовым тоном (доминирующая длина волны излучаемого светового потока) и насыщенностью (мера разбавленности основного цвета белым). Таким образом, задачей любого устройства формирования сигналов цветного изображения (УФСЦИ) является получение значений этих трех характеристик отображаемого объекта с целью формирования сигнала цветного изображения. На рисунке 2. представлена кривая МКО, на которой отображен весь диапазон тональностей и насыщенностей разных цветов, которые может различить человеческий глаз. В идеальном случае УФСЦИ должно иметь возможность различать все цвета, представленные на этой кривой, чтобы свести к минимуму цветовые искажения сигналов, и максимально приближать к оригиналу получаемое изображение.

Законы Грассмана и следствия, вытекающие из них, гласят, что для любого цвета входящего в цветовой охват системы нескольких стимулов, количества этих стимулов могут служить мерой этого цвета. Таким образом, взяв за основу систему нескольких стимулов и получая в каждой ячейки матрицы значения этих стимулов, можно восстанавливать исходное значение цвета, что и применяется в настоящее время при формировании ЦТВС с помощью матричных ПСС. Сами по себе матричные ПСС не обладают монохроматическими свойствами, поэтому они не способны передавать информацию о тоне и насыщенности объекта, а получаемые на выходе каждой ячейки матрицы сигналы представляют собой значения яркостей, экспонируемых соответствующими ячейками элементов. При применении таких ПСС без каких-либо доработок, не представляется возможным формирование системы нескольких стимулов, а, следовательно, невозможно определить и значение цвета, его тона и насыщенности, что не позволяет синтезировать цветное изображение. Для возможности получения цветного изображения необходимо в каждой ячейке матрицы производить разделение светового потока на несколько цветовых составляющих, которые будут являться основными стимулами, что позволит по значениям

этих составляющих впоследствии восстанавливать исходный цвет изображения. С этой целью на поверхность каждого светочувствительного элемента наносятся цветофильтры, обладающие повышенной пропускной способностью только в определенном диапазоне видимых частот спектра и не пропускающие световой поток в остальной его части. Таким образом, полученное значение на выходе ячейки матрицы ПСС характеризует значение определенного стимула из числа основных, а не яркость отображаемого объекта. Значения недостающих основных стимулов берутся путем их интерполяции с использованием для этого значений стимулов близлежащих элементов. Для определения оригинальных цветовых параметров отображаемого объекта, то есть его тона, насыщенности и яркости, необходимо сложить значения основных стимулов в определенном соотношении, определяемом квантовой эффективностью ПСС в области частот, соответствующих цветам основных стимулов. Однако реализовать устройство, способное различать все цвета, представленные на кривой МКО, даже с использованием всех современных научных достижений в области техники, пока еще невозможно, поскольку, чтобы охватить всю площадь этой фигуры, необходимо либо брать за основную систему стимулов несколько несуществующих цветов, либо определять в каждом элементе матрицы бесконечное число значений стимулов, соответствующих цветам, находящимся по периметру области видимых цветов.

Основными параметрами, определяющими качество и достоверность получаемого цветного изображения в УФЦСИ, являются светочувствительность, количество передаваемых градаций и точность цветопередачи. Каждый из этих показателей будет улучшаться или ухудшаться в зависимости от количества основных стимулов (число цветофильтров с разными диапазонами пропускания), от цветов этих стимулов (диапазонов пропускания этих цветофильтров), а так же от структуры расположения цветофильтров на поверхности ПСС. Совокупность цветофильтров, нанесенных на поверхность ПСС, сами используемые цвета и пространственное расположение этих фильтров на поверхности матрицы называется структурой массива цветных фильтров. Структура используемого массива во многом определяет принцип построения самого УФЦСИ, используемые в его работе алгоритмы интерполяции, необходимые для их реализации вычислительные мощности и качественные показатели этого устройства. В таблице 1 представлены наиболее часто используемые структуры массивов цветофильтров, а так же приведены некоторые особенности изображений, получаемых при помощи ПСС с нанесенными на них соответствующими этим структурам массивами. При разработке ПСС, используемых для получения цветного телевизионного сигнала (ЦТВС), необходимо учитывать особенности задач, на решение которых направлено разрабатываемое устройство, а так же требования, предъявляемые к показателям точности определения различных цветовых характеристик. На

основании анализа этих задач и требований можно принять решение об оптимальном для данного случая наборе свойств ПСС и способах их реализации, а так же обосновать выбор числа, цветов, и пространственного расположения основных стимулов. Будь то съемка движущихся объектов, масштабных сцен, множества цветных элементов, сцен с небольшим разбросом используемых цветов, но с большим диапазоном оттенков этих цветов и т.д. При этом так же необходимо учитывать психофизические свойства ЗСЧ. Одним из важнейших параметров, влияющих на характеристики ПСС, является используемая в этом преобразователе структура массива цветных фильтров.

На рисунке 2 а на кривую МКО нанесены многоугольники, обозначающие области цветов, охватываемые при использовании разных структур массивов цветофильтров, представленных в таблице 1. Форма и площадь, занимаемая этой фигурой, зависит от количества основных стимулов (количество цветофильтров с разными диапазонами пропуска), от цветов этих стимулов (диапазонов пропуска этих цветофильтров), а так же от структуры расположения цветофильтров на поверхности ПСС. Площадь, занимаемая каждой из образованных фигур, характеризует диапазон цветов, которые возможно правильно различить, используя ПСС с основными стимулами, образующими вершины этой фигуры. Цвета которые на графике лежат за границами фигуры будет невозможно различить, и они будут приниматься как ближайшие цвета, лежащие на границе этой области. Координаты точки на кривой МКО определяют тон и насыщенность цвета, характеризующие объект отображения. Тональность цвета определяется лучом, начинающимся в центре кривой МКО и проходящим через заданную точку. Насыщенность цвета определяется удаленностью этой точки от точки начала луча. Поскольку правильность передачи цвета объекта зависит не только от точности передачи тона объекта, но и от точности передачи его насыщенности, то структура массива цветных фильтров кривая различимости цветов которой охватывает большую площадь, будет охватывать и большее количество градаций цветов, следовательно, точность цветопередачи у такого устройства будет лучше. Однако нельзя не учитывать при этом такие особенности зрительной системы человека (ЗСЧ) как спектральную чувствительность глаза, и контрастные характеристики ЗСЧ. На рисунке 2 б изображен график кривой МКО с нанесенными на него в различных частях статистическими отклонениями уравниваний по цветности, то есть областями, в пределах которой стандартный наблюдатель при постоянной яркости объекта не заметит различий в цвете. На этом графике линии эллипсов соответствуют цветностям, отстоящим от центральной точки на величину стандартного отклонения, при установке равенства по цветности, для наглядности оси каждого эллипса увеличены в 3 раза. Этот график наглядно иллюстрирует неравномерность контрастных характеристик для разных цветовых областей, что говорит о

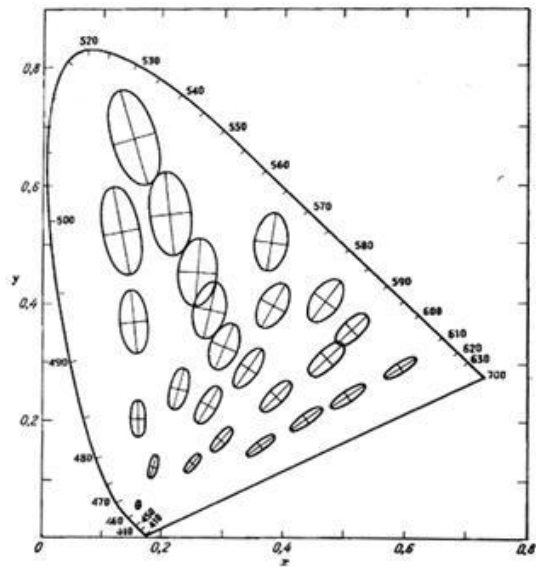
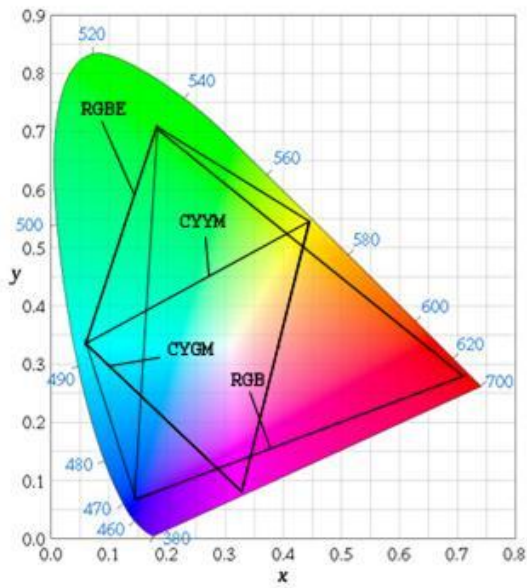
том, что в области зеленых цветовых составляющих глаз менее чувствителен к отклонениям в тональности и насыщенности цвета объекта, нежели в области красных и синих составляющих. Таким образом, число различных цветовых градаций, а, следовательно, и цветовой диапазон структуры массива будет зависеть не только от площади многоугольника, но и от расположения этого прямоугольника внутри кривой МКО. Можно построить равноконтрастный график МКО (рис. 2 г), учитывающий контрастные характеристики ЗСЧ, однако это все равно не позволит оценить цветовой охват разных массивов, поскольку размеры и пространственное расположение эллипсов останутся разными. Для сравнения цветовых охватов разных массивов необходимо произвести нормировку кривой МКО с учетом спектральной чувствительности глаза, так и контрастных характеристик ЗСЧ, то есть привести эллипсы к окружностям равных диаметров. Поскольку спектральная чувствительность глаза не является линейной функцией, то необходимо произвести нелинейное преобразование цветового графика x, y кривой. Наиболее эффективной и дающей наименьшее количество ошибок считается формула выведенная Мак Адамом:

$$\xi = 3751a_1^2 - 10a_1^4 - 520b_1^2 + 13295b_1^3 + 32327a_1b_1 - 25491a_1^2b_1 - 41672a_1b_1^2 + 10a_1^3b_1 + 5227$$

$$\eta = 404b_2 - 185b_2^2 + 52b_2^3 + 69a_2 * (1 - b_2^2) - 3b_2a_2^3 + 3b_2^2a_2$$

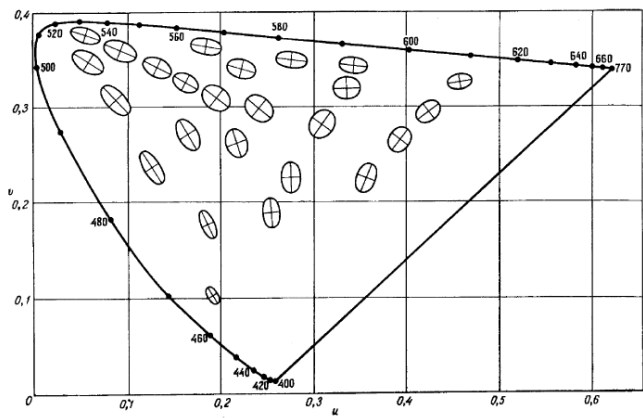
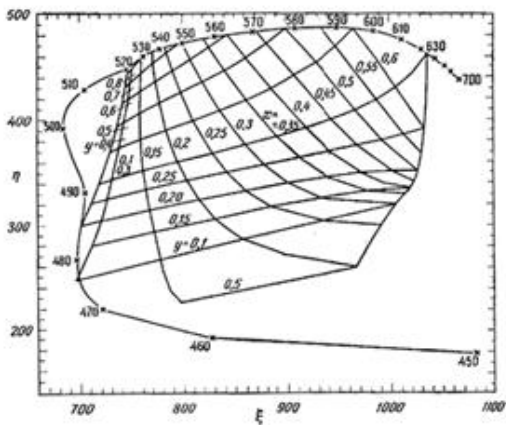
Где $a_1 = \frac{10x}{2.4x + 34y + 1}$; $b_1 = \frac{10y}{2.4x + 34y + 1}$; $a_2 = \frac{10x}{4.2x - x + 1}$; $b_2 = \frac{10y}{4.2x - x + 1}$.

Нелинейно преобразованный с применением данной формулы цветовой график представлен на рисунке 2 в. На этом графике контрастные характеристики для всех областей будут равномерными. Таким образом, можно произвести приблизительную оценку цветового охвата каждой структуры в зависимости от выбранных цветов основных стимулов. Нужно отметить что из представленных в таблице 1 структур наиболее оптимальной по параметрам цветового охвата будет структура RGBE, поскольку ее вершины образуют четырехугольник с вершинами в области длин волн равных 700 нм., 460 нм., 490 нм. и 530 нм. Площадь такой фигуры будет охватывать почти весь диапазон цветов от малой до высокой насыщенности, в то время как у других структур будет отсутствовать часть цветов, относящаяся к средненасыщенным и сильнонасыщенным в области длин волн от 460 нм. до 520 нм. В других областях различия будут не столь существенны. Такая структура является оптимальной из тех, что имеют широкое применения на сегодняшний день, однако она не является наилучшей.



а) кривая МКО с разными структурами.

б) области, уравненные по цветности.



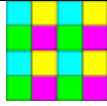
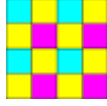
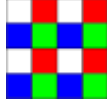
в) нелинейное преобразование кривой МКО.

г) равноконтрастный цветовой график.

Рис. 2. Кривая МКО и ее преобразования.

Таблица 1. Структуры массивов цветофильтров.

Название структуры	Образец структуры	Особенности изображений получаемых с помощью структур массивов
Фильтр Байера (RGB)		Самый универсальный фильтр в отношении показателей чувствительности цветопередачи. Не требующий сложной интерполяции
RGBE		Цветопередача увеличена ценой уменьшения чувствительности.

СУГМ		Цветовой диапазон расширен в области желто-зеленого и сине-зеленого цвета, за счет чего увеличивается чувствительность, но страдает цветопередача.
СУУМ		Значительно уменьшается цветовой диапазон, при очень небольшом повышении светочувствительности.
RGBW Байера		Светочувствительность увеличивается за счет внедрения бесцветных ячеек, однако возрастает сложность, и ошибки интерполяции. Наиболее универсальная структура.

ЗСЧ примерно в 10 раз чувствительнее к изменениям уровня яркости объекта, чем к изменению его цвета. Поэтому любые отклонения значения яркости от оригинального будут гораздо сильнее сказываться на визуальных ощущениях зрителя, нежели отклонения тона или насыщенности. Яркость объекта в случае представления цветовой информации о нем в виде значений основных стимулов (как это осуществляется в матричных ПСС) есть сумма яркостей этих стимулов, таким образом, на точности отображения яркости объекта сказываются любые искажения и ошибки в определении значений яркостей основных стимулов. Основная часть таких искажений может быть вызвана одним из следующих факторов: неидеальная квантовая эффективность матрицы, шумы, искажающие сигнал, поступающий от ячеек матрицы, ошибки квантования при АЦП и ошибки интерполяции недостающих основных стимулов.

При использовании матричных ПСС в любом случае при ФСЦИ необходимо производить квантование, интерполяцию недостающих цветовых компонент сигнала объекта, а так же считывать значения с ячеек матрицы. Соответственно отрицательное влияние этих факторов остается неизменным независимо от структуры используемого массива цветных фильтров. Однако можно улучшить квантовую эффективность отдельных элементов матрицы, введя в структуру массива дополнительные светофильтры, приводящие параметры элементов матрицы в соответствие с параметрами спектральной чувствительности человеческого глаза. В этом случае значение такой ячейки матрицы будет показывать яркость отображаемого объекта. Для отображения цвета объекта, попавшего на ячейку матрицы с нанесенным на нее светофильтром, придется интерполировать значения всех его цветовых составляющих, и распределять яркость объекта между ними пропорционально коэффициентам их значений, что приведет к неминуемому увеличению общей ошибки цветопередачи, поскольку будет увеличено как само количество интерполируемых цветов, так и расстояние между их узлами. Однако точность передачи значения яркости объекта в этом случае будет выше за счет увеличения ОСШ в ячейке

матрицы. Так же улучшится показатель ширины динамического диапазона и светочувствительности всего устройства в целом. Помимо этого можно проводить интерполяцию значений яркости в ячейках, содержащих только цветные составляющие, корректируя тем самым яркость отображаемого объекта. В конечном итоге при небольших потерях точности передачи цвета объекта будет достигнуто повышение точности передачи его яркости, что с учетом специфики работы ЗСЧ положительно скажется на характеристиках УФЦИ.

Наиболее универсальной из предложенных структур является RGBW. При сравнительно хорошем цветовом охвате, она обладает улучшенной светочувствительностью, что позволяет повысить качество получаемого изображения и точность передачи яркости отображаемого объекта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Д.Джад, Г.Вишецки Цвет в науке и технике. – М.: Издательство «МИР», Москва 1978 г. – 592 с.
2. Mark D. Fairchild Color appearance models. Munsell color science laboratory Rochester Institute of Technology, USA. 2004 г. -437 с.
3. K. Hirakawa and P. J. Wolfe, "Spatio-spectral color filter array design for enhanced image fidelity," in Proceedings of the IEEE International Conference on Image Processing, vol. 2, pp. 81–84, 2007.
4. R. Ramanath and W. E. Snyder, "Adaptive demosaicking," Journal of Electronic Imaging, vol. 12, pp. 633–642, 2003.

Безруков В.Н.

Романов С.Г.

Поташников А.М.