

Датчики изображения

(часть 3)

Ольга Гуреева (Москва)

В третьей части статьи рассматриваются принципы получения изображения с помощью ПЗС и КМОП-датчиков различных архитектур. Приводится описание важнейших характеристик датчиков – разрешения и динамического диапазона.

СВЕТ И ЦВЕТ

Датчики изображения – это устройства, определяющие лишь градации серого, то есть интенсивность света от белого до совершенно чёрного.

Для того чтобы изображение стало цветным, на кремний с помощью процесса фотолитографии наносится слой цветных фильтров.

В тех датчиках, где используются микролинзы, слой фильтров помещается между линзами и светочувствительными элементами. В сканерах, где используются трёхлинейные ПЗС (т.е. рядом расположены три отдельных ПЗС, реагирующих либо на красный, либо на зелёный, либо на синий цвет) и в некоторых профессиональных камерах, где также используются три датчика, цветное изображение получается простым суммированием изображения, поступающего с трёх матриц.

Более распространёнными являются устройства с одним датчиком. В таких устройствах для получения цветного изображения используются массивы цветных фильтров (color filter arrays – CFA) (см. рис. 16).

Каждый пиксел отвечает за «свой» цвет, для чего над ним помещается соответствующий фильтр. Фотоны, прежде чем попасть на пиксел, проходят через фильтр, который пропускает свет с длинами волн только «своего»

цвета. Свет с другими длинами волн поглощается фильтром. Известно, что любой цвет в спектре можно получить смешением нескольких основных цветов. В модели RGB таких цвета три – красный, зелёный и синий.

Для различных применений разработаны различные модели массивов цветных фильтров. Тем не менее в большинстве датчиков используется массив цветных фильтров Байера (Bayer pattern) (см. рис. 17).

Эта технология была предложена компанией KODAK в семидесятых годах прошлого века и основана на результатах работ по пространственному мультиплексированию. В системе Байера фильтры расположены попеременно, в шахматном порядке, причём количество зелёных фильтров в два раза больше, чем красных и синих. Порядок расположения фильтров таков, что красные и синие фильтры расположены между зелёными. Такое соотношение объясняется строением человеческого глаза. Наше зрение наиболее чувствительно к зелёному цвету. Расположение фильтров в шахматном порядке обеспечивает цветовую равномерность изображения независимо от того, как расположен датчик во время съёмки – горизонтально или вертикально.

Информация с такого датчика считывается последовательно, построч-

но. За строчкой BGBGBG следует GRGRGR и так далее, что представляет собой последовательность RGB.

В ПЗС суммирование трёх цветов для получения цветного изображения выполняется вне датчика. Наложение цветов происходит в устройстве обработки изображения после того, как сигнал преобразован из аналоговой формы в цифровую. В КМОП-датчиках совмещение цветов может происходить непосредственно на кристалле. В любом случае первичные цвета каждого пиксела математически интерполируются с учётом цветов соседних пикселей. В действительности имеют точный красный, зелёный или синий цвет, большинство из них получаются в результате совмещения этих трёх цветов.

При интерполяции обрабатывается матрица пикселей размером 3 × 3. При этом для определения цвета центрального пиксела сравниваются и учитываются значения окружающих пикселей.

Рассмотрим простейший пример, когда при трёх пикселах с синим, красным и синим цветовыми фильтрами (BRB), расположенными в ряд, требуется определить реальный цвет пиксела с красным фильтром. Если предположить, что отсутствуют средневзвешенные величины и все пиксели вносят одинаковый вклад в результирующий цвет, то цвет центрального (R) пиксела будет вычислен математически как две части синего и одна часть красного. В действительности алгоритмы даже простой линейной интерполяции намного сложнее, так как учитываются значения всех окружающих пикселей. При грубой интерполяции заметен шум от наложения цветов, в особенности на границе цветовых переходов.

РАЗРЕШЕНИЕ ДАТЧИКОВ

Сразу подчеркнём, что термин «разрешение» используется в цифровой графике некорректно. С точки зрения оптики, разрешение – это мера способности оптического устройства, в том числе и человеческого глаза, различать отдельные линии на специальных диаграммах, например, на диаграмме ISO, представленной на рис. 18.

В отличие от оптики, в компьютерной технике со времён первых мониторов разрешением принято назы-

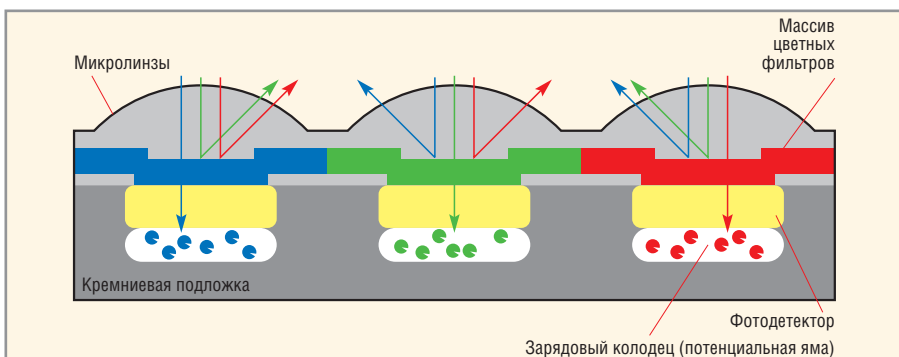


Рис. 16. Массив цветных фильтров CFA

вать количество пикселей, которое можно отобразить на экране. Поэтому в дальнейшем под разрешением датчика изображения будем понимать именно количество пикселей.

Количество пикселей, или разрешение датчика, связано с размером файла получаемого изображения и с тем, как он в дальнейшем будет обрабатываться. Существует прямая зависимость – чем больше пикселей, тем больше получаемый файл. Так, например, датчик изображения формата VGA размера 640 × 480 или 307 200 активных пикселей будет занимать в несжатом виде примерно 900 Кб (307 200 пикселей, по 3 байта R-G-B на пиксел составит 921 600 байтов, или 921 600/1024 составит 900 Кб). Датчик разрешением в 16 Мп создаст файл объёмом 48 Мб. На первый взгляд, подсчёт пикселей для определения получаемого изображения не представляет никакой сложности. Тем не менее производители датчиков в техническом описании указывают самые различные цифры, утверждая, что это и есть истинное разрешение устройства. Заметим, что общее количество пикселей – это число всех пикселей, физически существующих на датчике. При этом активными считаются только те, которые участвуют в получении изображения. Несколько процентов от общего числа пикселей являются «битыми» или «тёмными» и не участвуют в получении изображения. Они либо дефектные, либо используются датчиком для других целей. Например, могут быть предусмотрены маски для калибровки уровня темнового тока или для определения формата кадра. Формат кадра – это соотношение между шириной и высотой датчика. Например, в датчике с разрешением 640 × 480 пикселей это соотношение составляет 1,34 : 1, что соответствует формату кадров многих компьютерных мониторов. Это значит, что изображения, полученные такими датчиками, будут точно укладываться в рамки экранов мониторов без предварительного кадрирования. Во многих устройствах формат кадра соответствует формату традиционной 35-миллиметровой плёнки, где соотношение сторон кадра равно 1 : 1,5. Это позволяет делать стандартные снимки.

ИНТЕРПОЛЯЦИЯ РАЗРЕШЕНИЯ

Кроме оптического разрешения (реальная способность пикселей реа-

гировать на фотоны), существует также разрешение, поддерживаемое программными средствами, использующими интерполирующие алгоритмы. Как и в случае интерполяции цветов, при интерполяции разрешения математически анализируются данные соседних пикселей. При этом в результате интерполяции создаются промежуточные, дополнительные значения соседних пикселей. Такое «внедрение» новых данных происходит равномерно, что делает переход от реальных оптических данных к интерполированным данным в большинстве случаев практически незаметным. Тем не менее временами при интерполяции могут возникнуть различные помехи, в результате чего изображение только ухудшается. Поэтому существует мнение, что интерполяция разрешения – это не способ улучшения качества изображения, а лишь метод увеличения размера файла. Таким образом, при выборе датчика изображения необходимо обращать особое внимание на то, какое разрешение указано в документации к устройству. Не стоит возлагать особых надежд на интерполированное разрешение (оно может называться как *interpolated*, так и *enhanced*), если требуется получить качественное изображение.

Существует ещё один процесс программной обработки изображения, который называется субдискретизацией (*sub-sampling*). Этот процесс является обратным интерполяции. В случае ПЗС-датчика субдискретизация удаляет данные различных пикселей после того, как данные преобразованы из аналогового в цифровой вид. В КМОП-датчиках эту операцию можно провести непосредственно на кристалле, временно прервав считывание определённых строчек или считывая данные только с избранных пикселей. Субдискретизация используется в двух случаях. Во-первых, для уплотнения данных, чтобы иметь возможность поместить большее число снимков на карте памяти или во внутренней памяти устройства (чем меньше количество пикселей, тем меньше получается размер файла). И во-вторых, для создания изображений требуемого размера для определённых целей. Субдискретизация позволяет обработать изображение таким образом, чтобы оно оптимально отображалось на мониторах (если не ста-

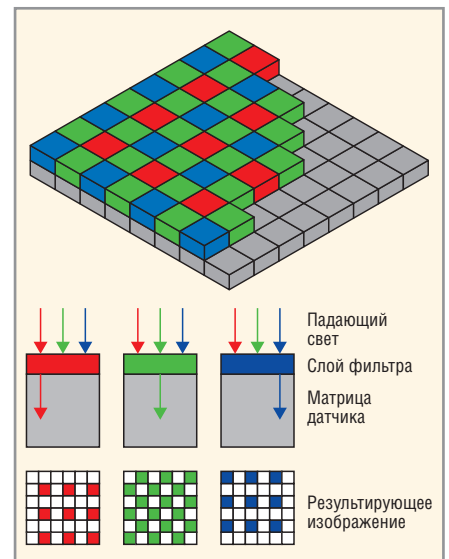


Рис. 17. Массив цветных фильтров Байера

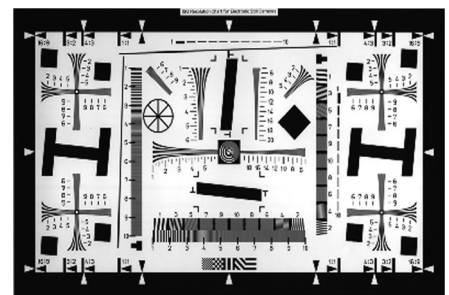


Рис. 18. Диаграмма ISO 12233

вить целью детализацию) или отправлялось быстро по электронной почте при медленном сетевом соединении.

После того как мы познакомились с основополагающими принципами работы датчиков изображения, рассмотрим более сложные ситуации, возникающие в процессе их функционирования.

Коллизии фотонов

Электроны, освобождённые в результате фотоэффекта, перемещаются по кристаллу датчика хаотически. На направление движения электронов влияет множество факторов – угол падения фотона на кристалл, длина волны фотона, структура кристаллической решетки атомов кремния, качество кремния, состав примесей, количество слоёв в матрице и т.д. Поэтому «выбивание» фотоном электрона ещё не означает захват последнего зарядовым колодцем. Электрон может быть обратно «затянут» кристаллом кремния или может переместиться в произвольном направлении. Также если фотон пересекает под определённым углом массив цветных фильтров, существует вероятность, что он попадёт не на свой, а на сосед-

ний светочувствительный элемент. Это может привести к искажению заряда соседнего пиксела. Такая помеха называется оптической перекрестной наводкой. Например, свет при некотором угле может пройти через красную область фильтра и проникнуть на соседний светочувствительный элемент с зелёным фильтром. В результате изображение искажается. Оптическую перекрестную наводку невозможно устранить на стадии обработки изображения. Она нейтрализуется с помощью создания специальных барьеров между пикселями. Так, например, компания KODAK для устранения этой помехи использует чёрные граничные участки в массиве цветных фильтров. Ряд других производителей, например Philips, используют металлические экраны, расположенные за массивом фильтров. Считается, что такой метод является более надёжным, чем чёрные границы фильтров. Тем не менее, и он не лишён недостатков. Во-первых, стоимость металла выше, чем стоимость полимера, во-вторых, металлические экраны занимают больше места и, в-третьих, увеличивается вес датчика.

Присутствие оптических помех связано с физической природой света. Уровень погружения фотона в кремний до момента преобразования в электрон зависит от длины световой волны. Если длина электромагнитной волны большая, то свет просто не задерживается в кремнии. Чем меньше длина волны, тем большей энергией обладают фотоны и тем быстрее формируются электроны. В случае, когда длина волны крайне мала, фотоны отражаются от поверхности датчика. Среди цветных фильтров Байера красный цвет обладает максимальной длиной волны, соответственно, фотоны красного цвета обладают меньшей энергией. Поэтому когда фотоны проходят через красный фильтр, они проникают глубже в кремний до момента преобразования в электроны. Это может привести к неправильной цветопередаче, то есть потере заряда на подложке или захвату электронов соседними зарядовыми колодцами. Как и в случае оптических помех, электрические помехи не поддаются корректировке на стадии обработки изображения. Для их минимизации используются специальные конструктивные решения, разрабатываемые на стадии проектирования датчиков.

РАСПЛЫВАНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ

Ещё один источник помех – это расплывание изображения. Зарядовые колодцы могут накапливать лишь ограниченное количество электронов. Это количество получило название коэффициента заполнения. При сильном потоке света электроны переполняют зарядовый колодец отведённого пиксела и «переливаются» в зарядовые колодцы соседних пикселей. Избыточный заряд, который перемещается от одного пиксела к другому, создаёт яркое пятно или полосы, которые приводят к расплыванию изображения. Наиболее распространённый метод устранения данного эффекта – это создание специальных барьеров и дополнительных зарядовых колодцев, предназначенных для приёма только избыточных зарядов. К сожалению, барьеры и дополнительные зарядовые колодцы занимают до 30% полезной площади пиксела, уменьшая как его чувствительность, так и квантовую эффективность. В некоторых случаях разработчики датчиков вынуждены идти на компромисс и в целях уменьшения себестоимости изделия мириться с такими недостатками, как расплывание изображения (если, конечно, подобное допускает приложение, в котором этот датчик будет использоваться).

ДИНАМИЧЕСКИЙ ДИАПАЗОН И ШУМ

Динамический диапазон датчика характеризует его способность «захватывать» оттенки изображения от самых тёмных до самых светлых тонов. Чем шире этот диапазон, тем больше оттенков изображения фиксируется датчиком.

Соотношение сигнал/шум также является важной характеристикой датчика. Это соотношение часто отражено в описании динамического диапазона датчика. То есть невозможно определить динамический диапазон датчика, не зная его уровень шума.

Интересно, что для обеспечения той же степени детализации, как и у фотоплёнки, особенно в тенях и в наиболее ярко освещённых участках изображения, динамический диапазон датчика должен быть больше, чем динамический диапазон фотоплёнки.

Датчики изображения являются электронными устройствами, поме-

хи в которых могут возникнуть по целому ряду причин, и все эти причины, в том числе описанные выше, приводят к нежелательным эффектам, искажающим изображения, т.е. к шумам.

В некоторых случаях пиксели неравномерно реагируют на свет, что приводит к образованию зон с разной чувствительностью. Тем не менее из всех шумов самую негативную роль, особенно в связи с динамическим диапазоном, играет темновой ток. Темновой ток – это ток, возникающий в электрической цепи датчика при отсутствии светового потока.

Основная причина появления темнового тока – это примеси в кремниевой подложке или повреждение кристаллической решётки кремния. В чистом кремнии темновой ток невелик, но при использовании особо чистых полупроводников значительно возрастает себестоимость готового изделия. К появлению темнового тока также приводят технологические нарушения в процессе производства датчиков, особенно на этапе ионного легирования, а также нагревание датчика. При повышении температуры устройства на 6...8°C значение темнового тока удваивается.

ТЕМПЕРАТУРНЫЕ РЕЖИМЫ

При продолжительной работе любая цифровая фотокамера нагревается, поэтому в профессиональных устройствах датчик изображения активно охлаждается. Для охлаждения используются вентилятор, элемент Пельтье либо свободная конвекция.

В датчиках, предназначенных для высокоточных научных и астрономических приложений, применяется жидкостное охлаждение. Определённый компромисс наблюдается в конструкции фотокамер с жидкокристаллическим видеоискателем. ЖК-экран таких камер крепится к корпусу с помощью откидного блока. Это решение удобно пользователям – проще наводить камеру. Но главное преимущество подобной конструкции заключается в том, что тепло, выделяемое лампами подсветки экрана, не попадает на корпус и не повышает температуру датчика изображения. Тем самым темновой ток не увеличивается. Соответствен-

но, изображение менее подвержено шумам.

Ещё один способ понизить уровень темного тока – это технология синхронизации режимов накопления, также называемая MPP-технологией (MultiPinned Phased technology), при которой с помощью изменения напряжения «дырки» (положительные заряды) перемещаются по поверхности кремния и притягивают свободные электроны.

Также используются диодные накопители дырок (HAD – hole accumulation diode), через которые «лишние» дырки переносятся в зону отрицательного заряда.

ЛОГАРИФМИЧЕСКИЙ МЕТОД ВЫЧИСЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКОГО ДИАПАЗОНА ДАТЧИКА

Заметим, что различные производители вычисляют динамический диапазон датчика по-разному. Компания Philips обоснованно утверждает, что нельзя говорить о динамическом диапазоне, не упоминая при этом температуры. В противном случае нельзя будет сравнить динамические диапазоны двух разных производителей в связи с различными методами расчётов.

В связи с этим наибольшее распространение получил логарифмический метод вычисления динамического диапазона для определения битовой глубины датчика:

$$\begin{aligned} \text{Динамический диапазон (дБ)} &= \\ &= 20 \times \ln[\text{полная зарядная} \\ &\text{ёмкость}/(\text{темновой ток} + \text{помехи})]. \end{aligned}$$

Полная зарядная ёмкость в данной формуле определяется количеством электронов в зарядовом колодце. Помехи также выражаются через количество электронов.

Допустим, что полная зарядная ёмкость составляет 40 960 электронов, помехи – 10 электронов. Разделив первую величину на вторую, получаем 4096. Вычислив десятичный логарифм, имеем 3,61236. Соответственно, значение динамического диапазона равно 72,25 дБ.

Идея данного подхода заключается в оцифровке выходного сигнала датчика с помощью АЦП, разрядность которого может быть 8, 10, 12 и более бит, для получения такого количества оттенков серого, какое позволяет уровень сигнала. При 10-битовой

оцифровке будет 1024 оттенков серого, а при 12-битовой – 4096. Если уровень сигнала составляет всего 60 дБ, что приблизительно соответствует отношению полной зарядовой ёмкости к шуму, равному 1024 (а это 2, возведённое в десятую степень), использовать 12-битный АЦП нецелесообразно.

В случае оцифровки сигнала 60 дБ с помощью 8-битного АЦП часть оттенков будет потеряна. При 8-битовой оцифровке можно получить только 256 оттенков серого цвета. Таким образом, для сигнала с уровнем 60 дБ следует использовать 10-битовый АЦП.

Динамический диапазон также зависит от размера пиксела. Чем меньше пиксел, тем меньше его зарядовая ёмкость, тем меньше динамический диапазон. С другой стороны, увеличение размера пиксела и, следовательно, зарядовой ёмкости не всегда приводит к увеличению динамического диапазона. Большой размер пиксела увеличивает вероятность возникновения различного рода помех, поэтому для увеличения динамического диапазона требуются дополнительные усилия по их нейтрализации.

Отношение размера датчика к количеству пикселей также влияет на уровень шума.

Более плотное расположение пикселей на датчике приводит к уменьшению размера пикселей и, соответственно, к увеличению вероятности появления электрических помех, что снижает динамический диапазон. Поэтому в профессиональных камерах используются датчики большего размера, которые и стоят дороже.

На сегодняшний день производители датчиков активно разрабатывают новые архитектуры устройств, которые смогли бы обеспечить высокую чувствительность, большой динамический диапазон и низкий уровень шумов при минимальном размере пикселей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Curtin D.P. Image sensors. www.shortcourses.com.
2. Grotta S.W. Anatomy of digital camera: Image sensors. www.extremetech.com.
3. KODAK CCD Primer #KCP-001, Charge-coupled device (CCD) Image Sensors. www.kodak.com.

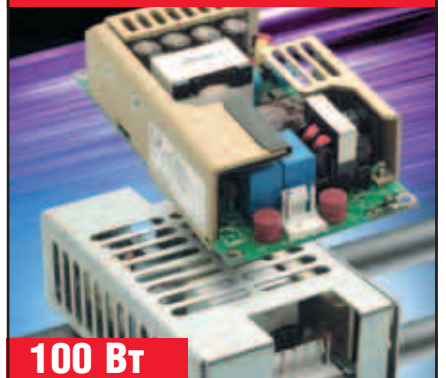
Источники питания АС/DC серии ЕСМ для промышленных и медицинских применений

- Соответствие требованиям UL/cUL 60601-1/EN60601-1
- Универсальный вход
- Предохранители в цепях нулевого и фазного проводов
- Ток утечки на землю менее 200 мкА
- Среднее время безотказной работы >250 000 часов



40/60 Вт

- Небольшие габариты 101,6 × 50,8 × 30,5 мм
- Одно-/двух-/трёхканальные модели с напряжениями 3,3...48 В
- Защита от поражения электрическим током: оборудование класса I и II
- КПД до 85%



100 Вт

- Габариты 114,3 × 63,5 × 30,5 мм
- Одно-/двух-/трёх-/четырёхканальные модели с напряжениями 3,3... 48 В
- Защита от поражения электрическим током: оборудование класса I и II
- КПД до 85%



THE XPERTS IN POWER

PROSOFT®

Тел./факс: (495) 234-0636/0640
info@prosoft.ru • www.prosoft.ru