УДК 621.383.4

СНИЖЕНИЕ УРОВНЯ ПОМЕХ С ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТЬЮ В СВЕТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ СЕНСОРАХ

Юшко Д.Е.[1], студент гр. 310201

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники[1]
г. Минск, Республика Беларусь

Дорошевич И.Л. – канд. физ.-мат. наук, доцент

Аннотация. В работе исследуется влияние температуры на качество изображения, формируемого КМОП-матрицами, с акцентом на снижение темнового тока и теплового шума при охлаждении сенсора. Показано, что уменьшение фоновых шумов улучшает соотношение сигнал/шум, что позволяет заметно снизить помехи.

Ключевые слова. Матрица, цифровой шум, помехи, качество, разрешение.

Введение. В современных цифровых фотоаппаратах используются два типа матриц: ПЗС (CCD) и КМОП (CMOS). Каждая из этих технологий имеет свои особенности, преимущества и недостатки. Принцип работы ПЗС-матриц (приборов с зарядовой связью) основан на том, что свет, попадая на фотодиоды в пикселях, преобразуется в электрический заряд, который накапливается и передается по цепочке пикселей к регистрам, где информация обрабатывается и преобразуется в цифровой сигнал. Таким образом, вся матрица последовательно передает заряд на обработку. Это обеспечивает высокое качество изображения, так как такие матрицы минимизируют шум и искажения, обеспечивают равномерность сигнала благодаря одинаковому времени экспозиции пикселей и обладают высокой чувствительностью к свету, что особенно важно при слабом освещении. Однако у ПЗС-матриц есть и недостатки: они требуют значительного количества энергии из-за сложной структуры и последовательного считывания, медленно обрабатывают данные, что снижает скорость съемки, и дороги в производстве, что делает устройства с ними менее доступными по цене.

КМОП-матрицы (комплементарные металл-оксид-полупроводниковые) используют иной подход: каждый пиксель работает независимо, имея собственный транзистор, который преобразует свет в электрический сигнал на уровне самого пикселя. Это позволяет считывать данные с каждого пикселя отдельно, что значительно ускоряет процесс. Такие матрицы потребляют меньше энергии, что делает их идеальными для мобильных устройств, таких как смартфоны и компактные камеры. Благодаря параллельной обработке данных с каждого пикселя они обеспечивают высокую скорость серийной съемки и имеют более низкую стоимость производства, что делает камеры с такими матрицами доступнее. Тем не менее, у КМОП-матриц тоже есть недостатки: они генерируют больше цифрового шума, особенно при слабом освещении, могут иметь неравномерность экспозиции из-за параллельного считывания данных и обладают меньшей чувствительностью к свету по сравнению с ПЗС-матрицами, что иногда снижает качество изображения в условиях низкой освещенности.

В итоге ПЗС матрицы имеют более высокую устойчивость к цветовому шуму и более точно определяют настоящий цвет (длину волны) света попадающего на каждый пиксель, однако в наше время уже практически не производят фотоаппаратов с использованием таких матриц. вместо этого используются более дешевые и современные КМОП матрицы со значительно более высоким разрешением, светочувствительностью и лучшей энергоэффективностью. Далее речь пойдет в основном про улучшения КМОП матрицы, однако это применимо и к ПЗС так как корень проблемы в обоих устройствах одинаков.

Для расширения возможностей фотографических устройств и независимости от внешних условий, обычно улучшают техпроцесс изготовления самих сенсоров, используют более чистые полупроводниковые материалы. Однако, это зачастую стоит больших средств. Поэтому предлагается изучить и проанализировать физические явления, происходящие в полупроводниках, для того чтобы при меньших затратах добиться повышения качества результата.

Основная часть. Есть множество факторов влияющих на чистоту получаемого изображения: алгоритмы обработки данных процессором, качество и физические размеры пикселей, плотность пикселей и др., но нас интересуют факторы, зависящие непосредственно от температуры сенсора: темновой ток, шум генерации рекомбинации, термический шум (шум Джона-Найквиста), отношение сигнал/шум (SNR).

Для понимания влияния температуры на работу светочувствительного сенсора для начала следует более подробно изучить, как работает КМОП матрица. Также как ПЗС, КМОП-матрица состоит из фотодиодов, но роль «хранителя» заряда выполняет конденсатор. Рядом с фотодиодом располагаются транзисторы. Первый в качестве электронного ключа открывающего цепь «фотодиод—конденсатор», второй для установки конденсатора в «начальное» состояние. Как правило,

«начальным» состоянием у конденсатора КМОП-матрицы будет заряженное состояние, а фотодиод будет разряжать его. Сначала конденсатор заряжается до определенного значения. Затем транзистор цепи заряда закрывается, и конденсатор начинает разряжаться через цепь фотодиода. Чем больше света попадает на фотодиод, тем больше он разряжает конденсатор. Затем измеряется оставшееся напряжение, и по полученному значению падения напряжения определяется количество света, попавшего на определенную ячейку. Время между прекращением заряда конденсатора и измерением напряжения на нем будет временем экспозиции. Напряжение и яркость света обратно пропорциональны «черному» цвету (или отсутствию света). В КМОП-матрице этому состоянию будет соответствовать полностью заряженный конденсатор, в ПЗС-матрице наоборот — незаряженная ячейка. Для считывания информации в структуру ячейки КМОП-матрицы добавляется дополнительный транзистор — усилитель, а также транзисторы выбора ячейки в составе столбца или строки. Кроме того, технология КМОП позволяет разместить на кристалле матрицы все аналого-цифровые элементы схемы, необходимые для получения полностью законченной системы на кристалле. Выходными интерфейсами матрицы могут быть цифровые интерфейсы или аналоговые. Для работы матрицы необходима лишь подача напряжения питания и кварцевый генератор [1].

Теперь стоит рассмотреть физику процессов, происходящих в полупроводниках, и то, как охлаждение меняет эти процессы.

1. Полупроводниковая структура КМОП-матрицы базируется на взаимодействии валентной зоны и зоны проводимости, разделенных запрещенной зоной. При снижении температуры энергии тепловых колебаний становится недостаточно для возбуждения электронов из валентной зоны в зону проводимости, что приводит к снижению фонового шума и улучшению соотношения сигнал/шум (SNR). Полупроводниковый материал в матрицах КМОП обладает узкой запрещенной зоной, которая определяет его чувствительность к температурным изменениям. Проводимость матрицы уменьшается с понижением температуры, поскольку меньше электронов получают достаточно энергии для преодоления запрещенной зоны и создания электронных дырок. Это физическое свойство позволяет снизить паразитные токи утечки при низких температурах, что способствует минимизации теплового шума.

2. Темновой ток — один из ключевых параметров, определяющих качество изображения, особенно в условиях длительной экспозиции [2]. Он возникает из-за движения носителей заряда, генерируемых за счет тепловой энергии, а также шумов генерации-рекомбинации. Эти процессы влияют на ток утечки, который создает "фон" на изображении и ухудшает контраст при низких уровнях освещения. При понижении температуры происходит снижение тепловой энергии, что уменьшает темновой ток. Это улучшает способность матрицы регистрировать слабые сигналы, так как уменьшается фон от тепловой генерации, не зависящей от света. Описывается это явление функцией:

$$I_{dark}(T) = I_0 exp\left(\frac{-E_A}{k_B T}\right), \quad (1)$$

где I_{dark} – темновой ток при температуре T;

I_0 – предэкспоненциальный коэффициент, зависящий от материала сенсора;

E_A – энергия активации;

k_B – постоянная Больцмана;

T – температура в кельвинах;

3. Шум Джонсона – Найквиста — это случайный шум, возникающий из-за теплового движения носителей заряда в проводящих областях [3]. Описывается формулой:

$$V_{noise} = \sqrt{4 k_B T \Delta f R}, \quad (2)$$

где V_{noise} – среднеквадратичное напряжение шума;

k_B – постоянная Больцмана;

T – температура в кельвинах;

Δf – ширина полосы частот;

R – сопротивление;

При повышении температуры электроны и дырки в материале обладают большей энергией, что приводит к их более активному движению и, как следствие, к увеличению амплитуды теплового шума. Понижение температуры снижает энергию случайных тепловых колебаний, благодаря чему уровень теплового шума уменьшается, а матрица становится способной к более точному и чистому захвату слабых фотосигналов.

Понижение температуры приводит к увеличению сопротивления полупроводникового материала, что может показаться парадоксальным в отношении повышения чувствительности матрицы. Однако

основное улучшение отзывчивости связано не с абсолютным увеличением сигнала, а с уменьшением фонового шума.

С уменьшением шума улучшение соотношения сигнал/шум позволяет регистрировать слабые сигналы. На уровне квантовой механики процесс основан на уменьшении вероятности тепловой генерации пар "электрон-дырка", которые создают нежелательные шумовые заряды. Снижение температуры ограничивает количество этих пар, делая возможным более точное измерение фотона, создаваемого световым сигналом.

Теория была подтверждена на практике проведением эксперимента. Выполнена фотография в полной темноте на КМОП матрицу с разрешением 10 млн. пикселей размера 22,2×14.8 мм при выдержке 30 секунд, светочувствительности 1600 единиц ISO и температуре приблизительно 30 градусов Цельсия (рисунок 1,2).

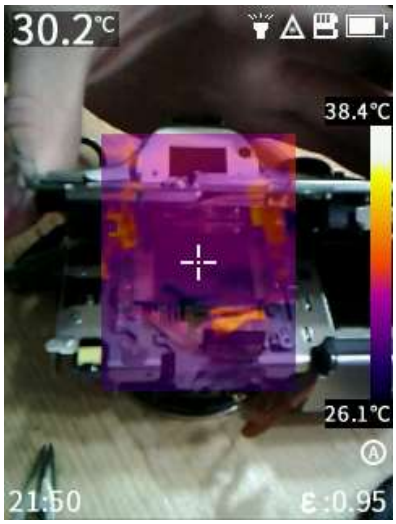

Рисунок 1 – измерение температуры матрицы тепловизором

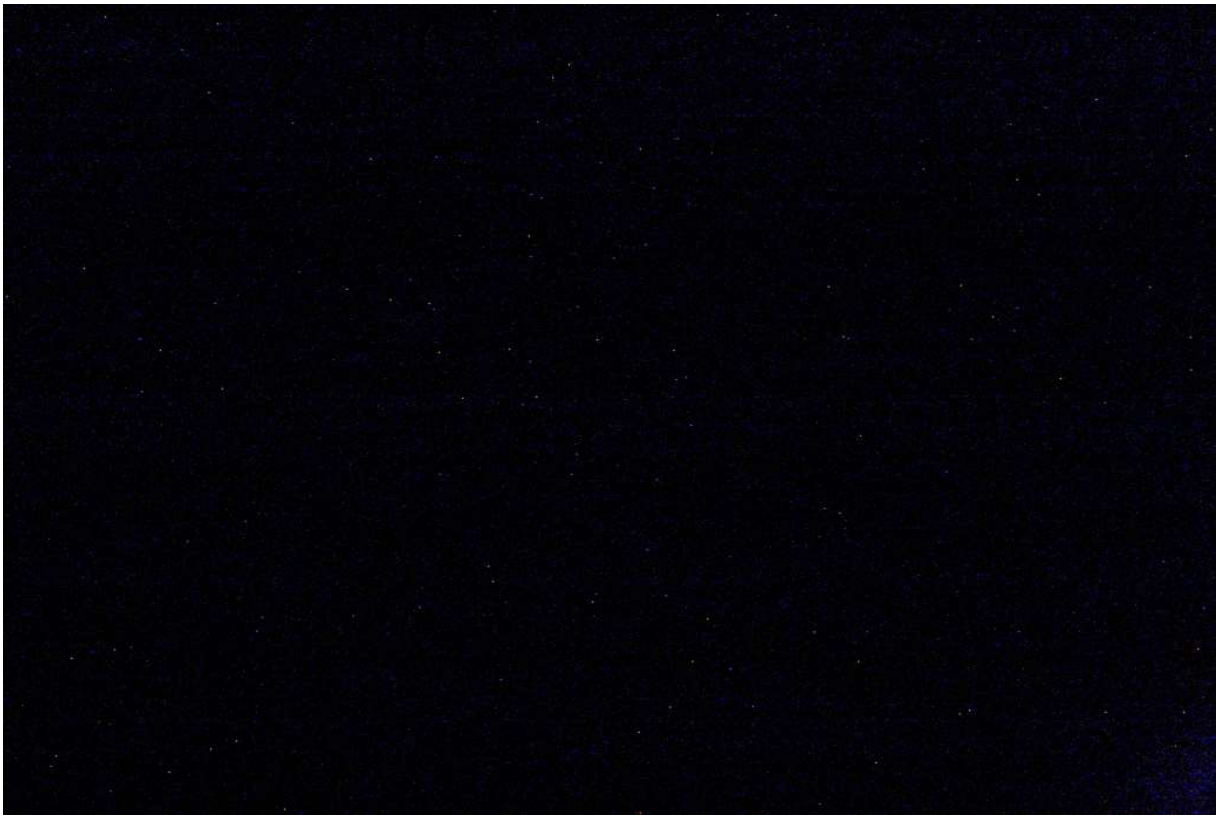

Рисунок 2 – количество шумов на фото при 30 градусах Цельсия.

После этого матрица была охлаждена до температуры около 16 градусов Цельсия (рисунок 3). Следующий снимок был сделан при тех же настройках фотоаппарата (рисунок 4).

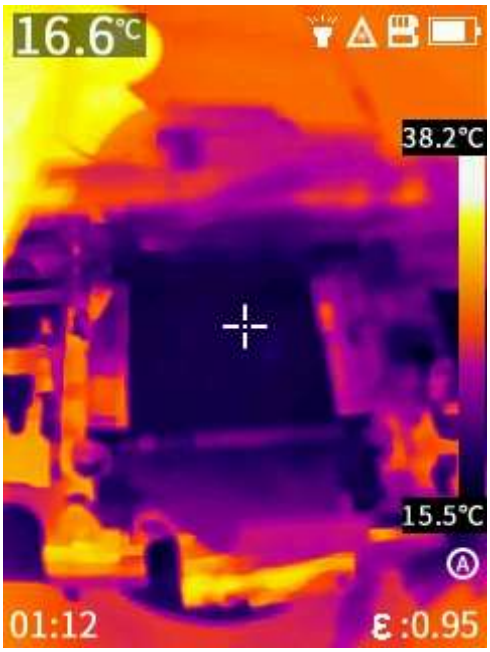

Рисунок 3 – измерение температуры охлажденной матрицы тепловизором

Рисунок 4 – количество шумов на фото при 16 градусах Цельсия

Для однозначного определения результатов эксперимента было проведено сравнение обоих снимков по соотношению площади заполнения пикселями каждого цвета к общей площади кадра при помощи калькулятора, размещенного на сайте tools366.com (рисунки 5 и 6).

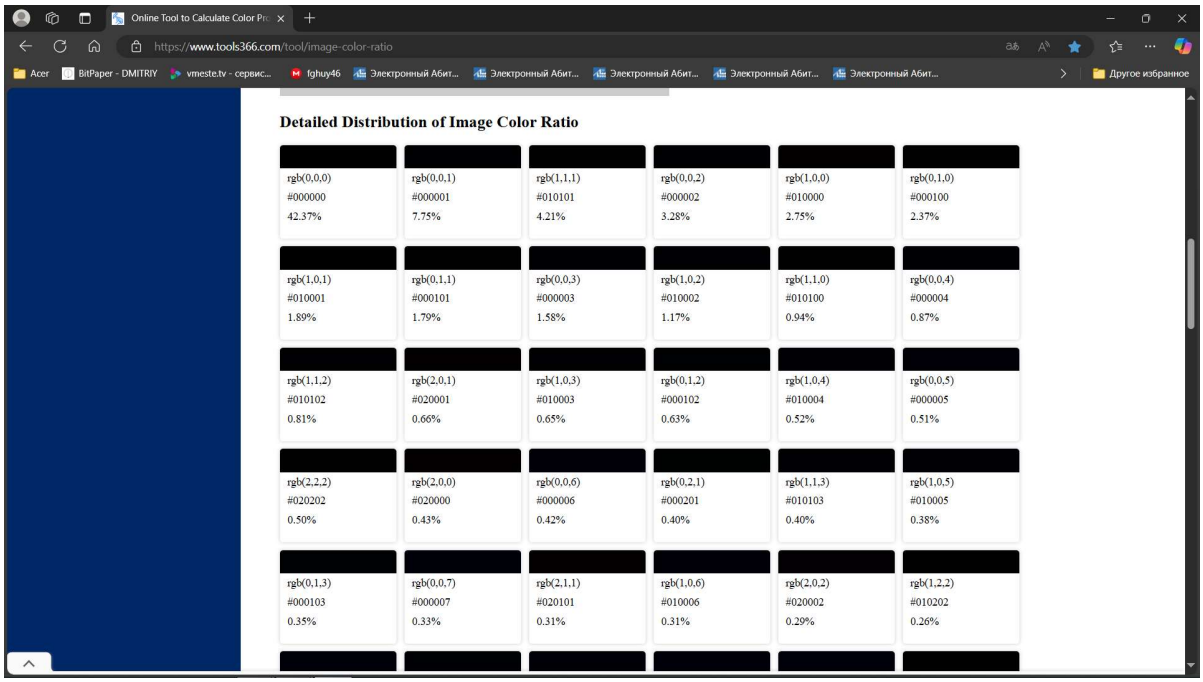

Рисунок 5 – процентное соотношение для снимка при 30 градусах Цельсия

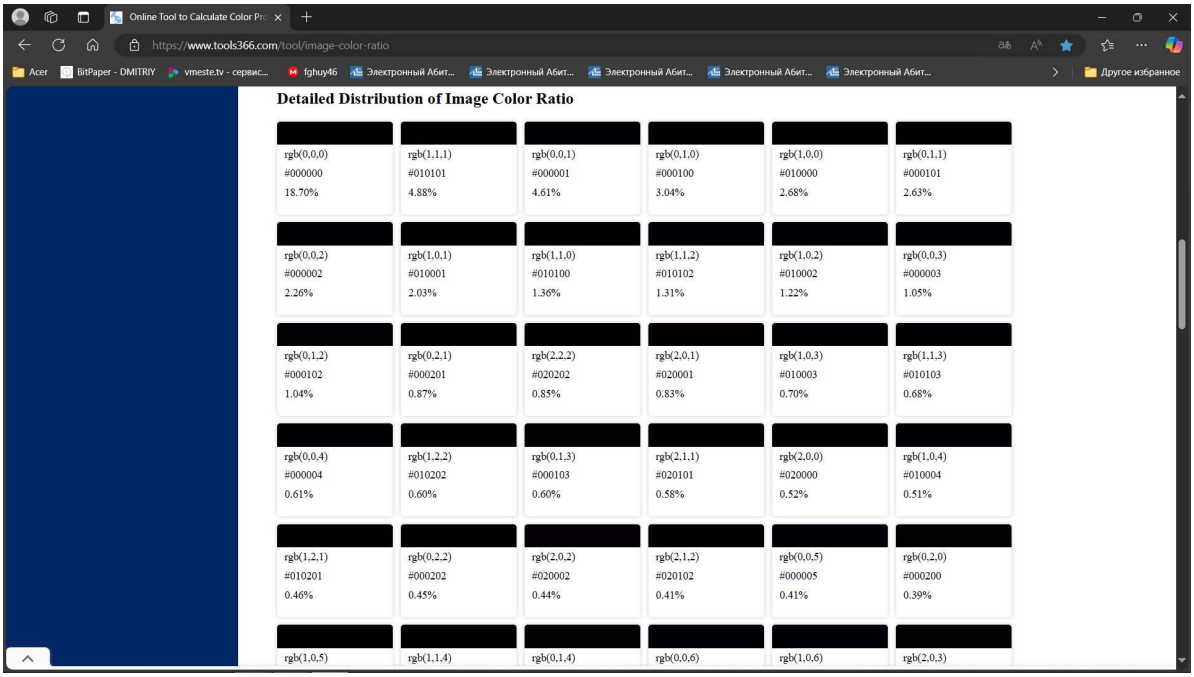

Рисунок 6 – процентное соотношение для снимка при 16 градусах Цельсия

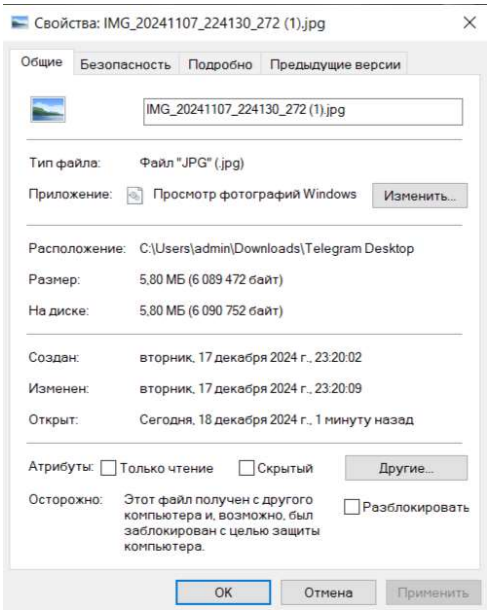

Рисунок 7 – объём первого фото 5.80 мегабайт

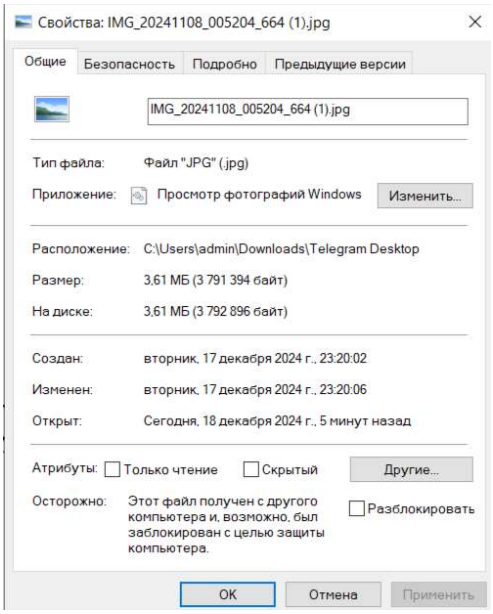

Рисунок 8 – объём второго фото 3.61 мегабайт

Из этих результатов видно, что, например, количество шумов синего цвета, он же rgb(0,0,1), на фото, сделанном при температуре 16 градусов Цельсия, уменьшилось в 1.68 раза или же на 40.5% по сравнению с фото, сделанном при температуре 30 градусов Цельсия. Кроме того уменьшился и объем файла (рисунок 7 и 8).

Заключение. Охлаждение КМОП-матриц значительно улучшает их характеристики. Уменьшение шума и темнового тока позволяет получать более качественное изображение, не содержащее помех, а следовательно занимающее меньший объём памяти на запоминающем устройстве. Это будет полезно при научных исследованиях, астрофотографии, аэрофотографии и т.п.

Список использованных источников:

1. Шевердин, А. Технологические инновации КМОП-камер OmniVision — оптимальный выбор для высокообъемных применений. Часть 1 / А. Шевердин // Компоненты и технологии. – 2008. - № 1. – С. 46 – 49.

2. Климов М. А. Приборы с зарядовой связью как средства измерений // Вестник МГУЛ – Лесной вестник. 2001. №5. – 181 с.

3. Сотников Александр, Гилберт Барри Коэффициент шума и логарифмические усилители // Компоненты и Технологии. 2008. №87. – 30 с.

UDC 621.383.4

REDUCING TEMPERATURE-DEPENDENT NOISE IN PHOTOSENSITIVE SENSORS

Iushko D.E.[1]

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics[1]*, Minsk, Republic of Belarus*

Doroshevich I.L. – PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor

Annotation. Abstract. This study examines the impact of temperature on image quality in CMOS sensors, focusing on the reduction of dark current and thermal noise when the sensor is cooled. It demonstrates that decreasing background noise improves the signal-to-noise ratio, significantly reducing interference.

Keywords. Matrix, digital noise, interference, quality, resolution.