

ЭОП/ПЗС => КМОП

Смена поколений устройств регистрации быстропротекающих процессов

Стремительное техническое развитие, сейчас больше похожее на взрыв, не оставило в стороне и область задач связанных с регистрацией быстропротекающих процессов. Совсем недавно — еще в начале этого века - задачи подсветки объекта съемки имели весьма громоздкие, энергоемкие и проблемные решения в виде газоразрядных ламп с огромными конденсаторными блоками. Но пришли лазерные диоды и светодиоды и решение задачи подсветки свелось буквально к «карманным» устройствами. Другая половина задачи получения изображений быстропротекающих процессов, представленная самими регистраторами, всегда решалась на уровне самых передовых технических достижений. На смену поколения фото и кино съемочной аппаратуры с механическими затворами пришло поколение скоростных фото регистраторов с высокооборотными турбинками затем настало время электронно-оптических затворных камер.

Частично в этой игре поучаствовали и твердотельные фотоприемные ПЗС (CCD) матрицы в камерах регистрирующих изображения объектов съемки, подсвеченных импульсными фотодиодными источниками света. Самостоятельно же ПЗС фотоприемные матрицы не могли обеспечивать экспозиции менее десятков микросекунд вследствие технической невозможности в достаточной степени блокировать образование фотоэлектронов в области хранения кадра, что приводило к засветки уже полученного кадра продолжающимся свечением процесса. Установка же перед ПЗС фотоприемной матрицы ЭОП затвора решало эту проблему и долгое время у пары ЭОП/ПЗС не было конкурента в области регистрации микро и наносекундных процессов.

Развитие КМОП технологии фотоприемных матриц позволило создавать на них фото и видео регистраторы быстрых процессов. Так на X конференции ВРЦ РАН, проходившей в 2017 году в Сарове, отечественными предприятиями ООО «ВИДЕОСКАН» (разработчик камер и мультикамерных комплексов) и ООО «РТК Инпекс» (разработчик КМОП матриц) был представлен макет восьмикадровой КМОП видеокамер и продемонстрирован эксперимент по временной селекции изображений объектов на видеозаписи с кадровым периодом 66 нс (Рис. 1а). В последствии с этим макетом проводились эксперименты, в том числе, в ИФВ РФЯЦ ВНИИЭФ и Нижегородском институте ИПФ РАН (см. Рис. 1б). В этих испытаниях макет КМОП камеры подтвердил техническую возможность создания многокадровых видеорегистраторов в наносекундном диапазоне экспозиций, а с учетом того:

- что камеры на КМОП матрицах это компактный, полностью твердотельный, а значит, более надежный прибор, с менее жесткими требованиями к условиям применения;
- что на кристалле фотоприемной матрицы КМОП технология позволяет разместить еще и АЦП, что предельно упрощает электронику камеры;
- что стоимость КМОП матриц в серийном производстве на порядки дешевле производства ЭОП,

надо признать, что ЭОП/ПЗС камеры завершают весьма насыщенную техническими достижениями историю создания и развития устройств регистрации быстропротекающих процессов.

В этой связи представляет интерес представление нового поколения регистраторов быстропротекающих процессов на фоне ЭОП/ПЗС камер по совокупности их функциональных возможностей.

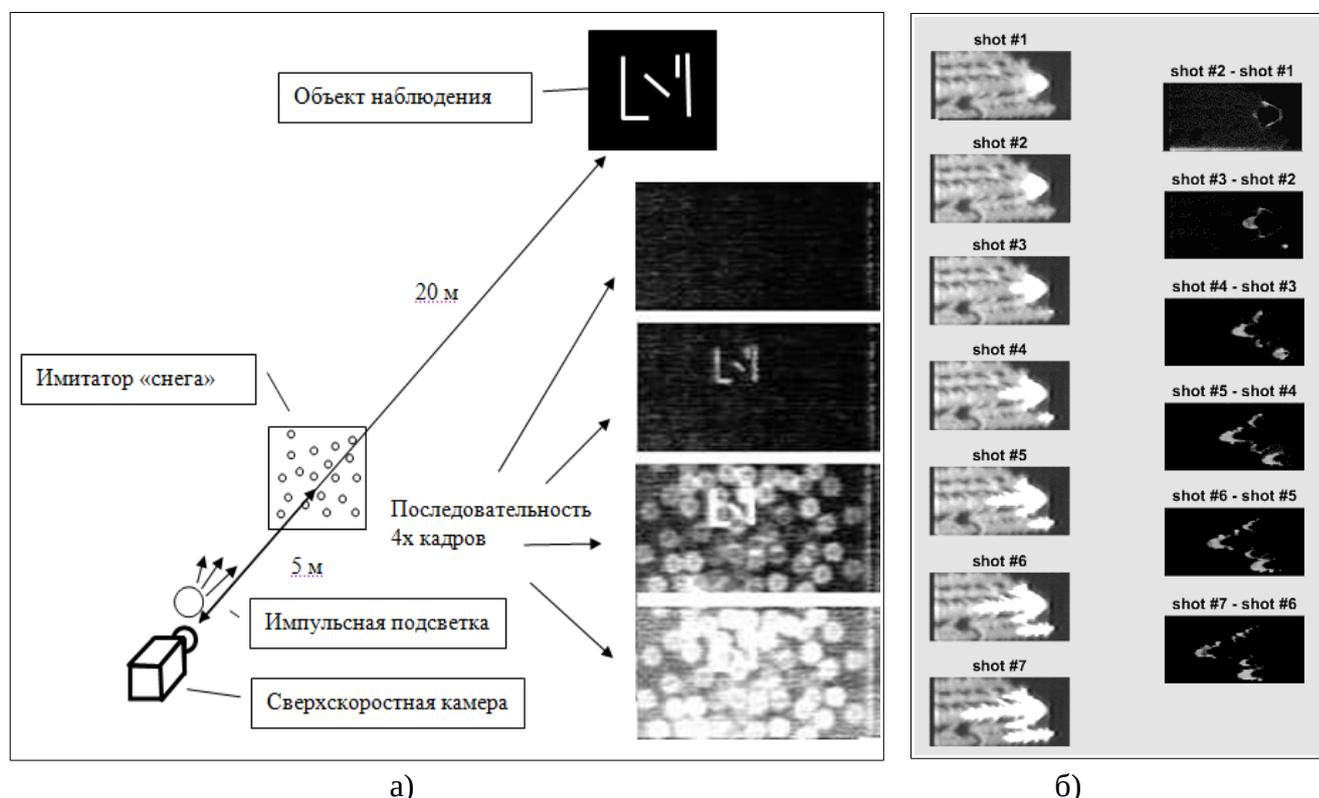


Рис. 1. Примеры видеозаписей макетным вариантом КМОП камеры. На Рис. 1а выделение объекта за преградой (имитатор снега) за счет временного разделения световых потоков от объекта и преграды. Кадровый период 66 нс. На Рис. 1б развитие разряда инициированного ТГц излучением в газовой среде. Левая колонка последовательность кадров с периодом 200 нс. Правая колонка разность изображений соседних кадров. Автор ИПФ РАН 2017г.

Перечень требований к регистраторам по качеству получаемых изображений включает, наряду с количеством пикселей, определяющих пространственное разрешение, такие параметры как чувствительность и возможность определения параметров объектов наблюдения по различию уровней яркости объекта и фона на получаемых изображениях - уровню контраста «К»:

$$K = (Y_f - Y_{ob}) / Y_f, \text{ где}$$

Y_f и Y_{ob} - яркость фона, на котором находится объект, и яркость самого объекта.

При этом следует принимать во внимание, что значения яркостей пикселей объекта и фона на полученных изображениях сопровождаются ошибками, обусловленными статистикой числа зарегистрированных фотонов. Поэтому при задании требований к регистрирующему устройству по обеспечению контрастного разрешения объектов следует определить и величину, характеризующую превышение разницы яркостей фона и объекта « δ » над стандартной ошибкой самих уровней яркости объекта и фона - « $\sigma_{\text{фона}}$ ». Эта величина, назовем ее дельта-сигма « δ/σ », определяется как:

$$\delta/\sigma = (Y_{\text{ф}} - Y_{\text{об}}) / \sigma_{\text{фона}}$$

Для значений этих параметров, выраженных в числе электронов справедливы соотношения:

$$\delta = N_{\text{min}} \times K$$

и

$$\sigma = \sqrt{Y_{\text{ф}}}, \text{ где}$$

K — контраст объекта, определяемый как отношение разности значений яркостей объекта и фона к значению яркости фона.

Минимальное значение числа накапливаемых фотоэлектронов « N_{min} », при котором начинает выполняться условие обеспечения контрастного разрешения равно:

$$N_{\text{min}} = \left(\frac{\delta}{\sigma \times K} \right)^2$$

Расчетные значения минимально требуемого числа фотоэлектронов « N_{min} » в зависимости от величин необходимого контрастного разрешения и параметра дельта-сигма приведены в Таблице 1, а в Таблице 2 приведены значения этих параметров, полученных в исследованиях опытного образца КМОП камеры.

Другим важнейшим параметром регистраторов является возможность контрастного разрешения как самых темных объектов на получаемых изображения, для которых выполняется условие контрастного разрешения (см. Таблицу 1), так и самых ярких объектов в изображении, яркость которых граничит с уровнем насыщения регистратора. Назовем этот параметр диапазоном контрастного разрешения - « D_k »:

Таблица 1

		K						
		0,25%	0.5%	1,0%	2,0%	4.0%	8%	16%
δ/σ	1.5	360000	90000	22000	5600	1400	350	90
	2.0	640000	160000	40000	10000	2500	625	160
	2.5	1000000	250000	62000	16000	4000	1000	250
	3.0	1500000	360000	90000	22000	5600	1400	350

Нижняя граница диапазона контрастного разрешения определяется значением N_{min} (см. Таблицу 1), а верхняя граница — N_{max} (см. нижняя строка Рис. 3б) техническим ограничением максимального числа носителей, которое для КМОП регистратора определяется величиной емкости накопления и предельным значением напряжения на ней. При этом следует учесть, что максимальная величина зарядовой емкости ограничивается условием обеспечения КТС-шума меньше СКО шума фотоэлектронов на нижней границе динамического диапазона контрастного разрешения. Эти условия определяются следующими соотношениями:

$$Dk = N_{max} / N_{min},$$

$$N_{max} = (U_{max} C [\Phi]) / q$$

$$N_{min} = (\sigma_{кТС} / S)^2$$

$$\sigma_{кТС} = (k T C[\Phi])^{1/2} / q,$$

где :

$\sigma_{кТС}$ — КТС-шум;

k — постоянная Больцмана;

T — абсолютная температура матриц;

$C[\Phi]$ — значение зарядовой емкости накопления в Фарадах;

q — заряд электрона;

S — коэффициент равный отношению КТС шума емкости накопления к шуму фотоэлектронов на нижней границе диапазона контрастного разрешения.

Из приведенных соотношений следует, что динамический диапазон КМОП матриц равен:

$$Dk = U_{max} S^2 q / kT$$

или, после подстановки значений констант и значений $T=300$ (это 27 град Цельсия) и $S= 0,45$ (при котором КТС шум добавляет в общий шум менее 10%):

$$Dk = 7,7 U_{max}$$

Примечательно, что динамический диапазон контрастного разрешения для КМОП матриц не связан с величиной требуемого минимального контрастного разрешения, которое, в свою очередь, определяет только величину емкости накопления в Фарадах, равную:

$$C[\Phi] = 7,7 N_{min} q$$

Диапазон контрастного разрешения при допустимом напряжении на зарядовой емкости, например, в 4В будет кратен 30. Это означает, что если задаться величиной контрастного разрешения в 1% и величиной $\delta/\sigma = 3$ число фотоэлектронов в зарядовой емкости на нижней и верхней границах диапазона Dk должны быть 90 тысяч и 2 миллиона соответственно.

ПЗС матриц же с таким зарядовым пакетом в настоящее время нет и вряд ли такая матрица может быть технически реализована.

В случае регистрации слабых изображений, где на первое место выходит уже не достижение контрастной чувствительности, а регистрации изображения с возможно меньшим шумом, и где возможность электронно-оптических преобразователей «усиливать яркость» изображений казалось бы дает преимущество ЭОП/ПЗС устройствам над КМОП матрицами. Однако это не так, поскольку шум изображения обусловлен статистикой числа зарегистрированных фотонов, пришедших на фоточувствительный элемент, в данном случае на катод ЭОП и его «усиление яркости» ни как не улучшает статистику, более того, ЭОП добавляют собственный шум.

Что касается КМОП матриц, то многие фирмы заявляют шум пикселей матриц менее 1 е-.

Еще одним принципиальным преимуществом КМОП регистраторов является возможность регистрация на одной матрице серии изображений, в то время как ЭОП/ПЗС регистратор может снять один или, с большими ограничениями, два кадра. К тому же в КМОП видеорегистраторах может быть реализована функция непрерывной перезаписи кадров наблюдаемого процесса «по кругу» с остановкой видеозаписи в нужной фазе наблюдаемого физического явления, делая возможным сохранить историю процесса до момента синхронизации.

В заключении в качестве примера технических возможностей КМОП регистраторов можно привести параметры проекта видеорегирующего комплекса разработанного предприятиями «ВИДЕОСКАН» и «РТК Инпекс».

- пространственное разрешение по полю не менее 2000x2000;
- число регистрируемых кадров с частотой более 10 мГц 32;
- контрастная чувствительность не хуже 1%;
- динамический диапазон контрастного разрешения более 30 дБ,

Исследования опытного образца КМОП камеры.

По результатам опытной эксплуатации макета КМОП камеры предприятием ООО «ВИДЕОСКАН» был выпущен и передан заказчику опытный образец камеры, в котором в значительной степени был подавлен собственный шум чтения, что позволило получить корректную оценку параметров матрицы.

Ниже приведены результаты исследования опытного образца скоростной камеры, производства предприятия ООО «ВИДЕОСКАН» на КМОП сенсоре, производства предприятия ООО «РТК Инпекс».

Целью исследования была оценка функциональных возможностей КМОП камеры в части получения изображений пригодных для наблюдения за малоконтрастными объектами в широком диапазоне яркостей.

Исследования камеры проводились на оптическом стенде предприятия ООО «ВИДЕОСКАН» функциональная схема которого представлена на Рис. 2.

Стенд, включающий КМОП камеру, контроллер, компьютер и ряд оптически устройств, позволял создавать на КМОП матрице фон различной интенсивности и проекцию миры, яркость которой управлялась диафрагмой объектива.

В качестве миры использовалась излучающая поверхность светодиода, а в качестве световой панели - набор таких же светодиодов с линзами, фокусирующими световой поток в область камеры.



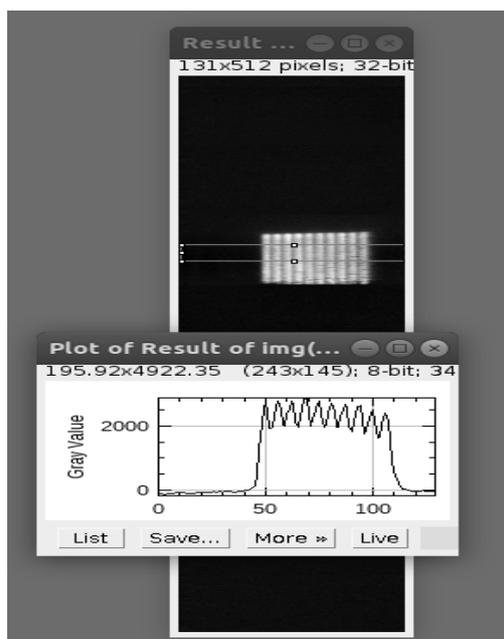
Рис. 2 Функциональная схема оптического стенда.

Мира и световая панель запитывались от единого источника импульсной подсветки с длительностью импульса $\sim 1\text{мкс}$ (см. Рис. 3).

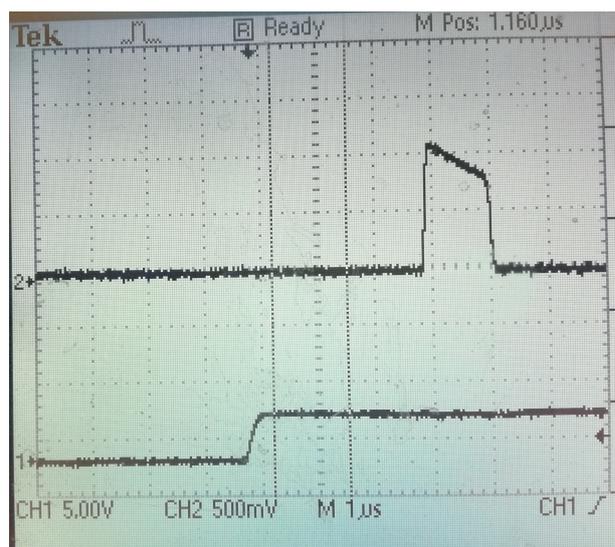
Положение заслонки определяло - наличие/отсутствие изображения мира в регистрируемом кадре.

Оптический аттенюатор, состоящий из двух поворачивающихся относительно друг друга поляризационных светофильтров, позволял изменять величину светового потока фона, падающего на матрицу.

Фотодиод использовался для контроля времени сдвига и интенсивности импульса подсветки (см. Рис. 3).



а)



б)

Рис 3. Изображение мира Рис. 3а с профилограммой изображения мира и осциллограмма сигнала фотодиода от импульса подсветки Рис. 3б. На нижнем луче сигнал кнопки ПУСК, на верхнем луче сигнал фотодиода.

Методика проведения экспериментов и коррекции геометрического шума КМОП матрицы

Методика проведения экспериментов включала получение изображений фона и мира с фоном с последующей коррекцией пространственного шума пикселей изображений. Для этого выполнялся следующий порядок проведения экспериментов:

1. устанавливалась желаемая яркость фона. Для этого вводилось изображение фона при закрытой заслонке (см. Рис. 2). Полученный файл транслировался в программу «ImageJ», в которой проводилось измерение средней яркости центральной области поля. При отличии полученной величины относительно от требуемой изменялся коэффициент пропускания оптического аттенюатора, и процедура повторялась до достижения желаемого уровня яркости фона;
2. после получения желаемого уровня яркости фона производился последовательный ввод десяти кадров изображения фона (при закрытой заслонке) и кадра с изображением мира (при открытой заслонке);
3. полученные изображения транслировались в программу «ImageJ», в которой вычислялось усредненное по восьми введенным кадрам поле фона;
4. производилась коррекция кадра с изображением мира путем вычитания усредненного поля фона из кадра с изображением мира;
5. производилась коррекция девятого и десятого кадра изображения фона путем вычитания из них поля фона, усредненного по восьми кадрам.

Все эксперименты проводились при установке временных задержек камеры определяющих попадание световой вспышки в третий кадр видеозаписей.

Результаты экспериментов

Результаты экспериментов, представленных в виде скриншотов полученных изображений и их обработки в программе «ImageJ», приведены на Рис. 3 — 5 и Таблице 2. При этом следует отметить, что приведенные изображения миры получены после значительного растяжения диапазона яркости откорректированных изображений вблизи яркости изображения миры.

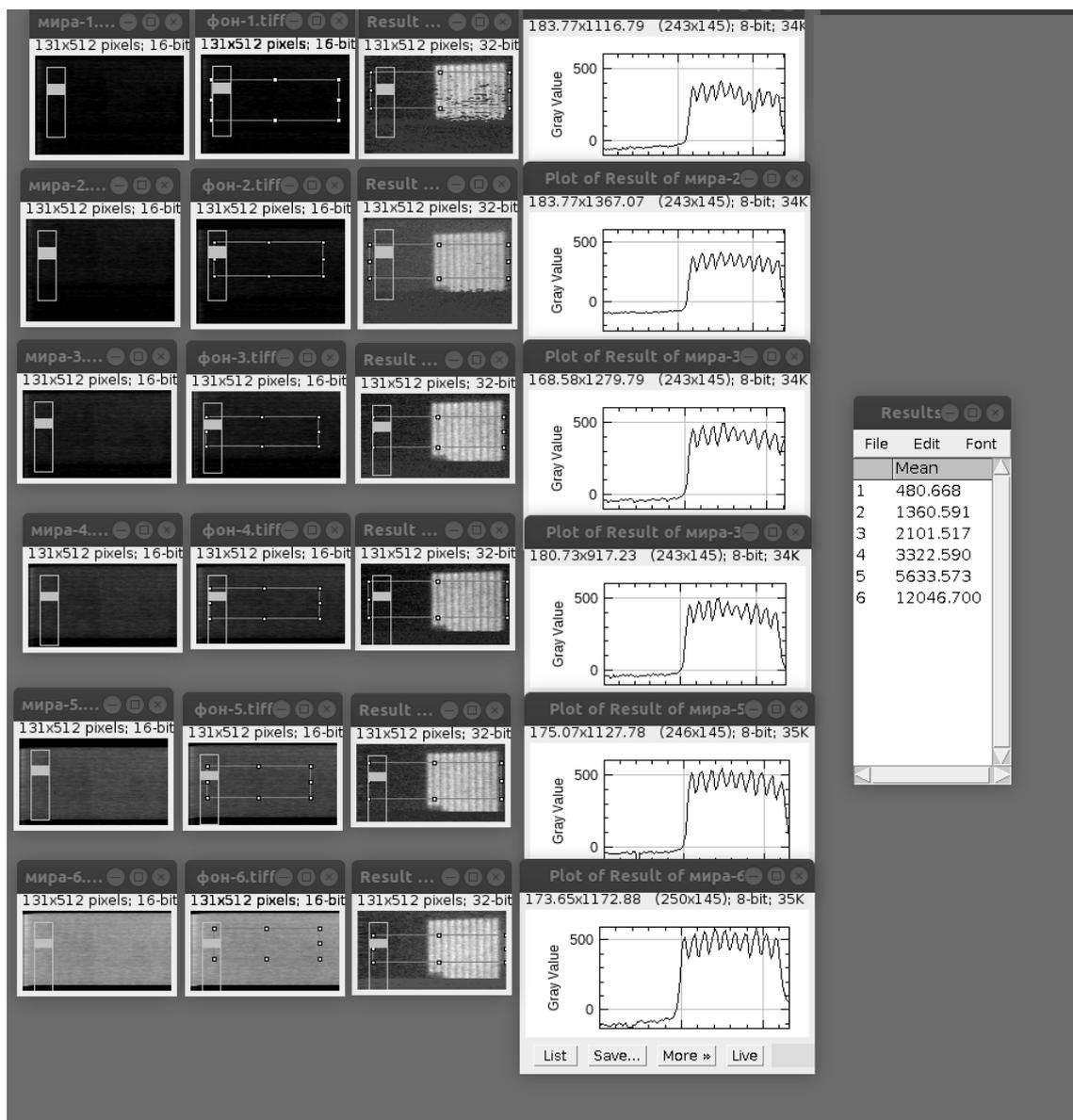


Рис. 3а. На рисунке слева направо:

- изображения фона с мирой;
- изображения фона;
- корректированные изображения миры;
- усредненные по столбцам профилограммы изображения миры;
- таблица значения яркостей изображений фона.

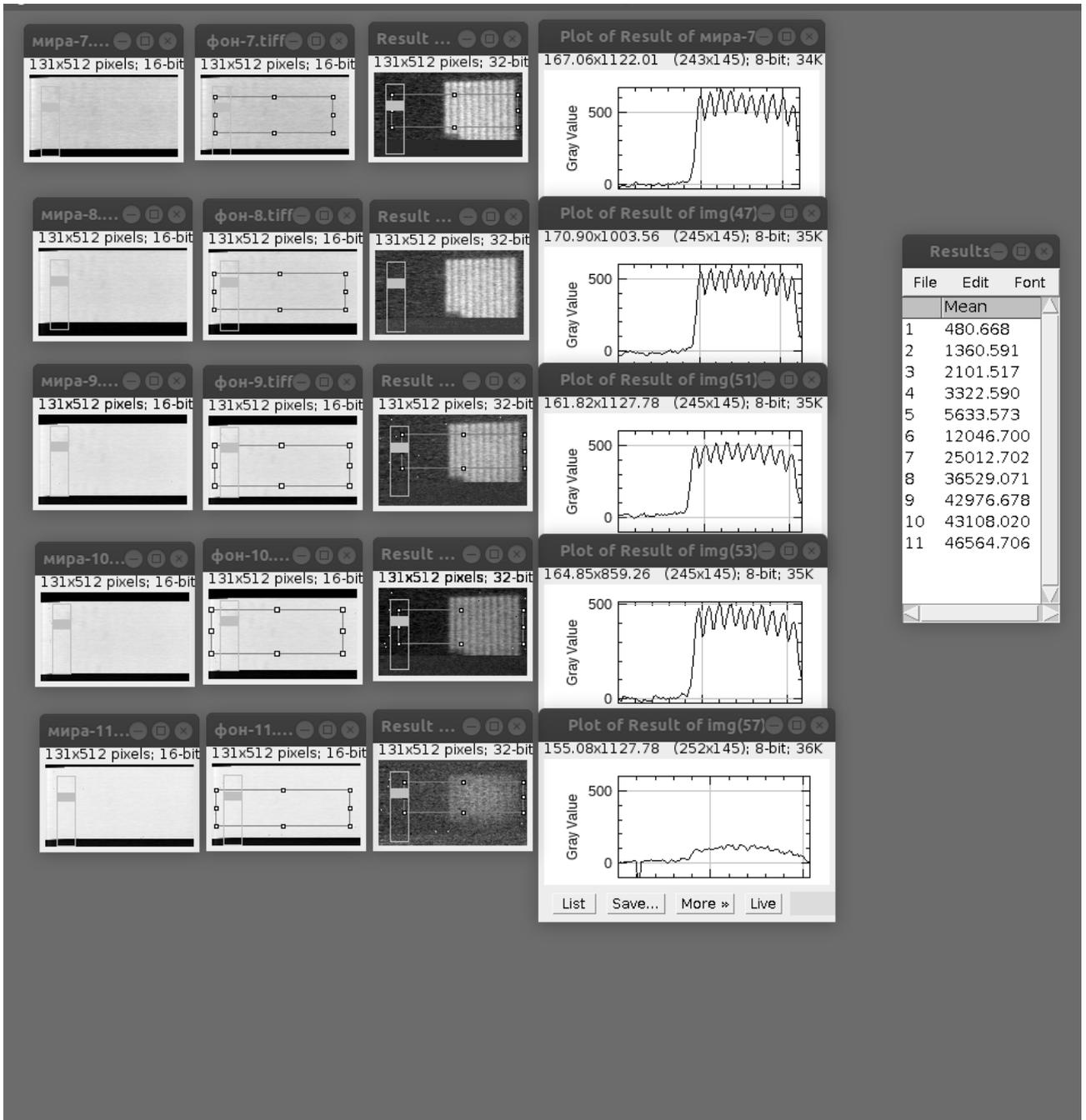


Рис. 3б (продолжение). На рисунке слева направо:

- изображения фона с мирой;
- изображения фона;
- корректированные изображения миры;
- усредненные по столбцам профилограммы изображения миры;
- таблица значения яркостей изображений фона.

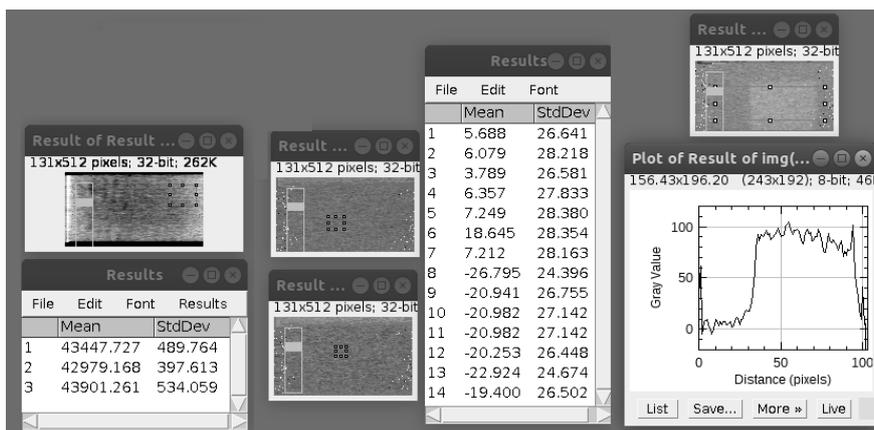


Рис. 4. На рисунке представлен пример коррекции (см. п. 5 Методики...) двух изображений фона с яркостью $\sim 43\ 200$ ед. АЦП и изображения фона с мирой. На рисунке слева направо:

- усредненное по восьми изображениям фона и таблица средних яркостей (Mean) и СКО (StdDtv) нескольких участков его изображения;
- изображения двух откорректированных полей фона;
- таблица средних значений (Mean) и СКО (StdDtv) нескольких участков откорректированных изображений фона. Строки 1-7 таблицы относятся к верхнему изображению и строки 8-14 к нижнему изображению;
- изображение миры с профилограммой яркости миры.

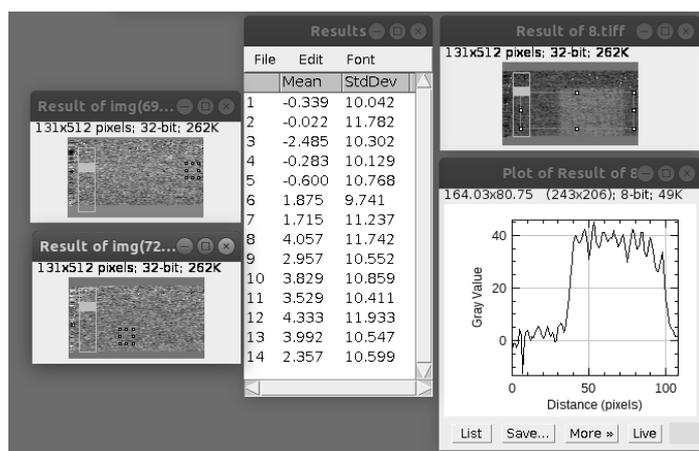


Рис. 5. На рисунке представлен пример коррекции (см. п. 5 Методики...) двух изображений фона с яркостью $\sim 6\ 545$ ед. АЦП и изображения фона с мирой. Слева направо:

- примеры изображения двух откорректированных полей фона;
- таблица средних разностей (Mean) и СКО (StdDtv) нескольких участков изображений двух откорректированных изображений фона. Строки 1-7 таблицы относятся к верхнему изображению и строки 8-14 к нижнему изображению;
- изображение миры с профилограммой яркости миры.

Таблица 2

	Параметры			
1	Яркость фона [adc] [e]	Y_{ϕ}	6 545 425 000	43 200 2 750 000
2	Яркость миры [adc] [e]	$Y_{\text{м}}$	35 2 240	95 6
3	СКО фона [adc] [e]	СКО $_{\phi}$	10 6 400	26 1 700
4	Наблюдаемый контраст изображения миры на полученных изображениях [%]	$Y_{\text{м}}/Y_{\phi}$	0.53 %	0.22 %
5	Значение δ/σ для контраста миры на полученных изображениях	$Y_{\text{м}}/\text{СКО}_{\phi}$	3.5	3.6
6	Количество фотоэлектронов [e]	$(Y_{\phi}/\text{СКО}_{\phi})^2$	0.43 E6	2.7 E6
7	Цена разряда АЦП [e]	$Y_{\phi}/\text{СКО}_{\phi}^2$	65	63

Совпадение значений цены разряда АЦП для уровней яркости 6 545 [adc] и 43 200 [adc] с ошибкой 3% позволяет считать полученные результаты корректными.

Результаты исследования параметров опытного образца КМОП камеры.

Результаты исследования опытного образца позволяют сделать следующие выводы.

Опытный образец камеры, выполненной на макетном (пробном) образце КМОП матрицы, показал высокие значения контрастного разрешения объектов на получаемых изображениях.

Эффективность, использованной методики коррекции геометрического шума матрицы, позволяет сделать вывод о возможности успешной коррекции разброса свет-сигнальных характеристик пикселей матрицы.

Относительно невысокое значение диапазона контрастного разрешения (16дБ) определяются заданным в проекте матрицы значением максимально-допустимого напряжения на зарядовой емкости около 1В, которое может быть большим.

Технические параметры исследуемого образца КМОП матрицы сведены в Таблицу 3.

Таблица 3

Технические параметры образца КМОП камеры

Размерность матрицы	64 x 128 пикселей
Число регистрируемых быстрых кадров	8
Кадровая частота	более 10 мГц
Зарядовая емкость	2 750 000 [e]
Диапазон контрастного разрешения Дк	16 дБ
Контраст объектов, разрешаемых со значением параметра « δ/σ » не менее 3.5:	
- на нижней границе Дк	0.53 %
- на верхней границе Дк	0,22 %

В заключении

Сейчас в мире существует огромное количество скоростных видеорегистраторов от тех, что уже есть в телефонах с кадровой частотой порядка 100 кадров/с до регистраторов с кадровыми частотами более 200 МГц (см., например, 4-х кадровую камеру PCO.dicam_C4_data_sheet.pdf с длительностью экспозиции от 4-х нс).

И хотя уровень развития микроэлектроники в нашей стране, увы, существенно отстает от мирового, приведенные выше исследования позволяют утверждать, что применительно к диапазону экспозиции более 10-50 нс уровень доступной отечественной КМОП технологии позволяет создавать видеорегистраторы с техническими характеристиками превосходящими или **принципиально не реализуемыми в ЭОП/ПЗС устройствах** это:

- **возможность создания 16-30 кадровых видеорегистраторов с одной фотоприемной областью для всех кадров без светоделения;**
- **возможность синхронизации видеорегистрации от характерного события уже начавшегося процесса с сохранением предыстории;**
- **возможность обеспечения предельно возможного контрастного и пространственного разрешения радиографических установок.**

Эти и другие возможности КМОП технологии, например, интеграцию в микросхему фотоприемной матрицы АЦП, обусловлены гибкостью бурно развивающейся КМОП технологии, позволяющей в широком диапазоне варьировать параметрами фотоприемной матрицы, адаптирую их к задачам и методикам проведения экспериментов.

При этом - все эти возможности реализуются в твердотельном приборе, очевидно имеющим принципиально большую устойчивость к внешним воздействиям и меньшие габариты в сочетании с преимуществами их серийного производства.

Интерес к этим камерам проявляют как ядерные центры в Сарове и Снежинске, так и институты РАН, но каждому из них нужны по одному образцу в свои многочисленные институты, лаборатории и учебные кафедры, а объединить ресурсы для заказа партии 15-20 шт. они, в силу совершенно непреодолимой системы финансирования, даже и не пытаются.

В тоже время ООО «РТК Инпекс» и ООО «ВИДЕОСКАН» - еще в 2017 году на X конференции ВРЦ РАРАН, проходившей в Сарове, определяли срок разработки-поставки первой серийной партии камер в 1.5 — 2 года. И, не занимаясь наши федеральные агентства составлением бумажных дорог перспектив научно технического развития на десятилетия вперед, а мостили бы ее камнями, что прямо сейчас лежат под ногами, то, уже сегодня, такие камеры были бы в руках исследователей. Конечно о «дорожные камни» можно и споткнутся, но еще раз повторю, что примеры зарубежных камер, наш опыт разработки и применения этих камер в реальных исследованиях дает все основания утверждать, что уровень доступной отечественной КМОП технологии **уже сейчас позволяет создавать фото и видео регистраторы с параметрами во многом превосходящими возможности уходящего поколения ЭОП/ПЗС устройств.**