

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
А В Т О М Е Т Р И Я

№ 1

2002

УДК 681.3.01

Е. В. Савченко
(Москва)

**РАСШИРЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ДИАПАЗОНА ПЗС-КАМЕРЫ
ПУТЕМ МНОГОКРАТНОГО ЭКСПОНИРОВАНИЯ**

Рассмотрена процедура синтеза изображения из кадров, полученных фотографированием объекта при разных значениях выдержки видеокамеры на приборах с зарядовой связью. Приведен практический пример применения данного метода, являющегося решением проблемы нехватки динамического диапазона видеокамеры. Произведена оценка систематической погрешности.

Введение. В современных условиях проведения оптических экспериментов в качестве регистрирующего устройства во многих случаях целесообразно использовать видеокамеру на основе ПЗС-матриц (приборов с зарядовой связью). Однако при попытке измерить малые изменения интенсивности сигнала на ярком фоне [1] или получить изображение с неравномерным распределением интенсивности часто возникает проблема нехватки динамического диапазона. На динамический диапазон видеокамеры оказывает влияние величина максимального заряда, который может быть перенесен данным типом прибора, и уровень собственных шумов аппаратуры: $D = 20 \lg(Q_{\max}/\delta^2)$, где D – динамический диапазон, Q_{\max} – максимальный заряд, δ^2 – среднее квадратичное значение флуктуаций зарядовых пакетов [1]. Уровень собственных шумов аппаратуры в специализированных видеокамерах обычно уменьшают путем применения различных охлаждающих систем. Предлагаемый метод синтеза изображения может решить проблему нехватки динамического диапазона для видеокамер с любым значением разрядности АЦП.

Рассмотрим кратко суть метода. Во многих видеокамерах существует возможность настройки времени выдержки. Если изображение статично или медленно изменяется во времени, то обычно возможно получить несколько фотографий интересующего объекта при разных значениях выдержки. Зная закон изменения полезного сигнала от времени выдержки камеры, можно из фрагментов этих фотографий синтезировать новое изображение, содержащее информацию как о слабых изменениях яркости сигнала, так и сильных его всплесках. Сформированное изображение может быть использовано для проведения любого вида последующей цифровой обработки и измерений на изображении. Особое значение этот метод приобретает при последующей нелинейной двумерной обработке изображения.

Характеристики	Значения характеристик
Формат матрицы ПЗС	752 × 582
Размер чувствительной области элемента	6,46 × 4,83 мм
Дискретные времена экспозиции электрического затвора	20 мс: 8,3 мс: 4 мс: 2 мс: 1 мс: 500 мкс: 200 мкс: 100 мкс
Чувствительность при светосиле объектива F1.2 и экспозиции 20 мс (25 Гц)	0,25 лк
Чувствительность при светосиле объектива F1.2 и экспозиции N с	$\frac{5}{N} \cdot 10^{-3}$ лк

Рассчитаем величину динамического диапазона используемой в экспериментах видеокамеры VStTV (фирма «Видеоскан») на основе камеры ССВ-М27В/СЕ фирмы "Sony". Характеристики ПЗС-матрицы камеры приведены в таблице. После обработки аналоговых сигналов в блоке АЦП на вход компьютера поступает оцифрованное значение напряжения сигнала. Разрядность АЦП камеры VStTV равна 8. Градации яркости полутонового изображения принято называть уровнями серого. Поэтому такая разрядность АЦП соответствует 256 уровням серого на изображении.

При полном затемнении ПЗС-матрицы регистрируемое изображение составляют отсчеты с нормальным распределением, математическим ожиданием 5,5 и дисперсией 2,2 уровней серого. Изменение времени экспозиции камеры не оказывает влияние на закон распределения отсчетов. Можно предположить, что появление в условиях полного затемнения ПЗС ненулевых отсчетов определяется влиянием шумов аппаратуры.

Таким образом, приведенную выше формулу для расчета динамического диапазона ПЗС-матрицы можно использовать для расчета динамического диапазона всей камеры, если заменить аналоговые значения напряжения их оцифрованными значениями. Реальный динамический диапазон составляет $20 \lg((255 - 5,5)/2,2) = 41$ дБ.

Проблема нехватки динамического диапазона данной видеокамеры возникла при попытке регистрации изображения дифракции Фраунгофера на круглом отверстии. Так, не удалось получить на одном кадре изображения главный максимум и побочные максимумы. Уже первые побочные максимумы регистрировались на фоне шумов. При значительном увеличении времени выдержки камеры удавалось получить кадры, содержащие отчетливые изображения боковых максимумов и минимумов дифракционной картины. В этом случае время выдержки камеры составляло 4 мс, а изображение главного максимума оказывалось обрезанным по уровню максимального значения сигнала.

Рассматривая проблему динамического диапазона видеокамеры, необходимо учесть эффект блуминга как возможную причину искажения видеосигнала при больших значениях интенсивности света. При избыточной освещенности элементов матрицы ПЗС избыток электрических зарядов, накопленный в ячейках матрицы за время экспозиции, перетекает в соседние ячейки. Изображение оказывается размытым. Большинство современных матриц ПЗС имеет антиблуминговые устройства. В таких камерах наибольший уровень сигнала соответствует максимальному заполнению электриче-

скими зарядами потенциальной ямы ячейки матрицы, т. е. определяется электрической емкостью ячейки.

Экспериментальная установка состояла из лазерного источника света, транспаранта с круглым отверстием, видеокамеры и персонального компьютера. Изображение дифракции регистрировалось непосредственно на фоточувствительной области матрицы ПЗС.

Линейная зависимость накопления заряда от времени накопления. Приборы с зарядовой связью обладают свойством линейности закона накопления заряда в зависимости от времени накопления. Если аналого-цифровое преобразование сигнала произведено корректно, то и выходной цифровой сигнал должен удовлетворять свойству линейной зависимости от времени экспозиции. Это предположение было проверено экспериментально при регистрации с разными значениями экспозиции изображения равномерно освещенного белого листа бумаги. Время накопления можно было установить равным дискретным значениям 20 мс, 8,3 мс, 4 мс, 2 мс, 1 мс, 500 мкс, 200 мкс, 100 мкс. «Усредненный» регистрируемый отсчет вычислялся путем усреднения отсчетов по всему полю изображения. Измерения проводились в двух режимах: включенном и выключенном аппаратных режимах гамма-коррекции в камере. Зависимость величины «усредненного» регистрируемого отсчета от времени экспозиции представлена на рис. 1. Очевидно, что для обеспечения линейности характеристики необходимо эксплуатировать камеру в режиме выключенной гамма-коррекции.

Временное масштабирование изображений. Таким образом, если регистрируется статическое изображение, возникает возможность с помощью цифровой обработки синтезировать из нескольких кадров новое изображение с увеличенным динамическим диапазоном сигналов. Каждый кадр, полученный с помощью камеры и введенный в персональный компьютер с помощью аналого-цифрового преобразователя, может быть представлен матрицей размером i строк на j столбцов. Значение элементов этой матрицы соответствует яркости элементов изображения. В рассматриваемом случае кадр содержал 256 строк и 256 столбцов. Вид дифракции Фраунгофера на круглом отверстии имеет отличительные особенности – главный максимум

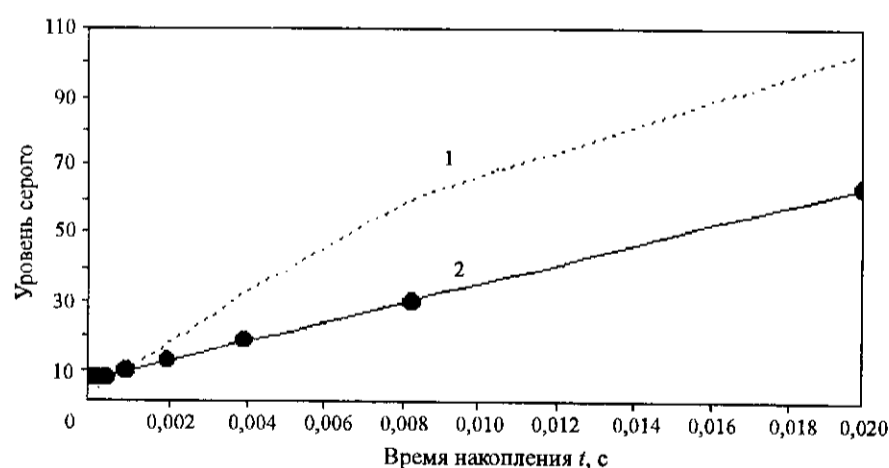


Рис. 1. Зависимость выходного сигнала от величины экспозиции: гамма-коррекция включена (1), гамма-коррекция отключена (2)

высокой интенсивности и побочные максимумы значительно меньшей интенсивности [2, 3]. Поэтому для синтеза результирующего изображения в данном случае оказалось достаточно двух кадров, полученных при значениях выдержки камеры 100 мкс и 1 мс. Однако для других видов изображений можно выбирать другое количество кадров и другие значения выдержки камеры. Отбор количества кадров производит исследователь с учетом формы сигнала и конкретных целей формирования результирующего изображения. Основным критерием выбора кадров, принимающих участие в формировании результирующего изображения, должно служить попадание полезного сигнала в область значений интенсивности между максимальным уровнем сигнала и уровнем собственных шумов аппаратуры.

Рассмотрим подробно метод синтеза результирующего изображения на примере изображения дифракции Фраунгофера на круглом отверстии. Для этого выбирается кадр BN с наименьшим временем накопления сигнала t_{abs} (100 мкс), а другое изображение «масштабируется» к этому же времени накопления сигнала. Из каждого отсчета масштабируемого изображения необходимо предварительно вычесть математическое ожидание шума аппаратуры s (для камеры VStTV это значение составляет 5,5), так как шум всего приемного тракта аппаратуры не зависит от времени экспозиции. Затем каждый отсчет кадра умножался на экспозицию t_{abs} и делился на значение экспозиции t_N (1 мс), при которой зарегистрирован данный кадр. Математически это можно представить как

$$MN_{i,j} = (AN_{i,j} - s) \frac{t_{abs}}{t_N} + s, \quad (1)$$

где AN – исходный кадр, который необходимо подвергнуть операции масштабирования; MN – масштабированное изображение; i, j – элементы изображения.

Затем из двух кадров, приведенных к одному масштабу, формировалась матрица, содержащая наибольшую информацию об областях как высоких, так и низких значений сигнала. Максимум интенсивности подвергнутого масштабированию изображения соответствует значению

$$\max = (255 - s) \frac{t_{abs}}{t_N} + s. \quad (2)$$

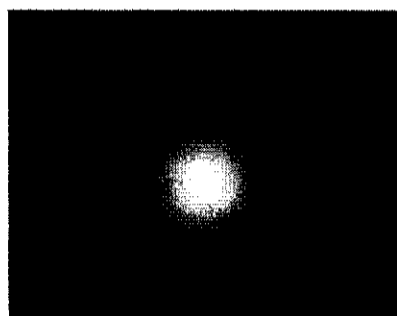
Для рассматриваемого случая $\max = 30,45$. Это значение целесообразно выбрать в качестве порогового и результирующее изображение сформировать по формуле

$$\begin{aligned} R_{i,j} &= BN_{i,j} \text{ при } BN_{i,j} > \max, \\ R_{i,j} &= MN_{i,j} \text{ при } BN_{i,j} < \max. \end{aligned} \quad (3)$$

Динамический диапазон значений новой матрицы данных можно определить по формуле

$$D = 201g \left(\left(255 - \frac{st_{abs}}{t_N} \right) \frac{t_N}{\delta^2 t_{abs}} \right). \quad (4)$$

Рис. 2. Результирующее изображение дифракции Фраунгофера на круглом отверстии в логарифмическом масштабе



Динамический диапазон нового изображения составил 61 дБ.

Полученное результирующее изображение представлено на рис. 2. Интенсивность всех отсчетов результирующего изображения была подвергнута операции логарифмирования и временному масштабированию для более наглядного представления результатов (при котором визуально можно видеть как главный, так и побочные максимумы):

$$K_{i,j} = \frac{255}{\max 1} \ln(R_{i,j}), \quad (5)$$

где K – изображение дифракционной картины в логарифмическом масштабе, а $\max 1$ – максимальная величина из $\ln(R_{i,j})$.

Исходные изображения дифракции Фраунгофера представлены на рис. 3 и 4 тоже в логарифмическом масштабе. На рис. 3 представлен кадр, соответствующий времени накопления 100 мкс. На этом кадре хорошо представлен главный максимум, а побочные максимумы регистрируются на уровне собственных шумов аппаратуры. Результирующее изображение (см. рис. 2) лишено этих недостатков. На рис. 4 видно, что изображение главного дифракционного максимума имеет равномерную максимальную интенсивность. Это объясняется тем, что сильный световой сигнал вызвал переполнение потенциальных ям ячеек матрицы, а избыток электрических зарядов скомпенсирован действием антиблумингового устройства видеокамеры. В то же время на изображении отчетливо видны боковые дифракционные максимумы.

Оценка систематической погрешности. Произведем оценку систематической погрешности данного алгоритма. Отсчеты подвергаемого масштабированию изображения $AN_{i,j}$ представим как сумму истинных значений

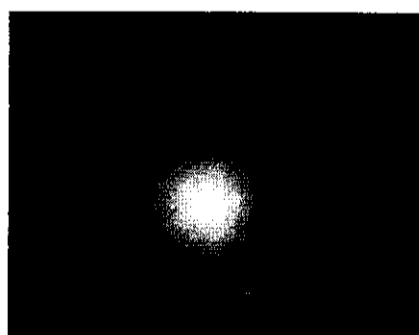


Рис. 3. Изображение дифракции Фраунгофера при $t_{obs} = 100$ мкс

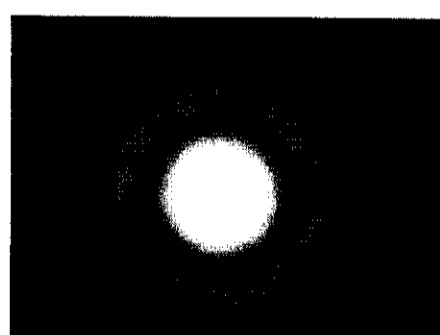


Рис. 4. Изображение дифракции Фраунгофера при $t_N = 1$ мс

отсчетов $an_{i,j}$ и ошибки $\Delta AN_{i,j}$, вызванной влиянием шума квантования АЦП:

$$AN_{i,j} = an_{i,j} + \Delta AN_{i,j}.$$

Отклонение значений шума аппаратуры в каждом отсчете матрицы AN от математического ожидания s обозначим $\Delta s_{i,j}$. Отсчеты масштабированного изображения $MN_{i,j}$ представим как сумму истинных значений матрицы $mn_{i,j}$ и систематической погрешности вычисления каждого отсчета $\Delta MN_{i,j}$:

$$MN_{i,j} = mn_{i,j} + \Delta MN_{i,j}.$$

Переписав формулу (1) для истинных значений отсчетов изображений, получим

$$MN_{i,j} - \Delta MN_{i,j} = (AN_{i,j} - \Delta AN_{i,j} - s + \Delta s_{i,j}) \frac{t_{abs}}{t_N} + s - \Delta s_{i,j}, \quad (6)$$

откуда

$$\Delta MN_{i,j} = \Delta s_{i,j} - (\Delta s_{i,j} - \Delta AN_{i,j}) \frac{t_{abs}}{t_N}. \quad (7)$$

Оказывается, что систематическая погрешность алгоритма зависит от отношения t_{abs}/t_N . Для ее уменьшения следует выбирать в качестве изображения, к масштабу которого приводятся все остальные изображения, кадр, полученный при наименьшем уровне экспозиции. При выборе коэффициента масштабирования t_{abs}/t_N , меньшего 1, шум квантования АЦП и любой другой шум уменьшают свои значения по сравнению с исходным изображением. На результирующем изображении будут области с высоким уровнем шума, соответствующие «образцовому» изображению, и области с низким уровнем шума, соответствующие «масштабированному» изображению.

Заключение. Представленную процедуру синтеза изображений можно разделить на несколько блоков.

1. Получить N изображений статического объекта при разных значениях экспозиции камеры.
2. Произвести обработку изображений по формуле (1).
3. Сформировать из нескольких изображений, приведенных к одному временному масштабу, результирующее изображение, например, по формуле (3).

В заключение необходимо отметить, что при использовании камеры VSfTV метод может быть применим только к статическим объектам, так как ввод и запись кадров в персональный компьютер осуществляется оператором. Применение быстродействующих видеокамер с возможностью автоматического ввода и записи серии кадров с минимальным временем между ними и различным временем накопления решило бы эту проблему. Скорость ввода изображений и максимальное время накопления должны быть в несколько раз выше скорости протекания регистрируемых процессов.

Также при регистрации сигнала с локальными пересветками во избежание пережигания матрицы ПЗС целесообразно использовать в оптической части установки световые фильтры. Рассмотренный алгоритм может быть применен при создании автоматизированных систем обработки изображений различного назначения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Разумов Л. А., Федорова Е. В. Фоточувствительные приборы с зарядовой связью. М.: Изд-во МЭИ, 1998.
2. Королев Ф. А. Теоретическая оптика. М.: Высш. шк., 1966.
3. Гершензон Е. М., Малов Н. Н., Мансуров А. Н. Курс общей физики. Оптика и атомная физика. М.: Просвещение, 1992.

*Московский энергетический институт,
E-mail: kate_mail@mail.ru.com*

*Поступила в редакцию
12 февраля 2001 г.*

Подписка на наш журнал – залог Вашего успеха!