



УДК 681.785.5

А. А. Ухов

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)*

## Применение цифровой двойной коррелированной выборки для обработки сигнала линейного ПЗС-фотоприемника

*Рассмотрены принципы построения цифровой двойной коррелированной выборки для обработки сигнала линейного ПЗС-фотоприемника. Показана возможность снижения уровня шумов путем статистической обработки результатов многократной оцифровки сигнала каждого пикселя ПЗС-фотоприемника.*

### Прибор с зарядовой связью, двойная коррелированная выборка, оптический спектрометр

Твердотельные преобразователи оптического излучения в электрический сигнал, известные как приборы с зарядовой связью (ПЗС), достаточно давно и успешно применяются для регистрации двумерных и одномерных оптических изображений. Двумерные изображения регистрируются матричными фотоприемниками при получении фотографий и видеоматериалов. Одномерные изображения регистрируются линейными ПЗС-фотоприемниками как в бытовых электронных устройствах, например в сканерах, так и в промышленных и научных приборах, наиболее интересными из которых являются оптические спектрометры, используемые для анализа свойств веществ и параметров источников излучения [1]–[5].

Обработка и анализ сигнала ПЗС-фотоприемника производится с применением микропроцессоров или персональных компьютеров, и для этого он должен быть преобразован в цифровую форму с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Выходной сигнал ПЗС-фотоприемника формируется транзистором с так называемым плавающим затвором (либо с плавающей диффузионной областью), под который последовательно подаются зарядовые пакеты, сформированные в соответствующих элементах секции накопления и пропорциональные количеству поглощенных фотонов. Для корректного преобразования каждого последующего зарядово-

го пакета в выходной сигнал предыдущий пакет удаляется импульсом сброса. В результате в выходном сигнале присутствует уровень напряжения, пропорциональный зарядовому пакету, а также уровень напряжения, соответствующий его отсутствию (уровень нуля). Однако после сброса выходной сигнал имеет некоторые флуктуации – так называемый КТС-шум, который зависит от остаточного заряда, температуры и емкости плавающего затвора. КТС-шум может быть практически полностью устранен с помощью двойной коррелированной выборки (ДКВ), применяемой в подавляющем большинстве устройств с ПЗС-фотоприемниками [6]. Для этого в ДКВ с помощью соответствующих управляющих импульсов производится фиксация уровня нуля  $U_R$  после сброса зарядового пакета, а затем выборка сигнала  $U_S$  (рис. 1). Разница этих напряжений и дает итоговую амплитуду полезного сигнала.

ДКВ является аналоговым устройством и строится по принципу устройства выборки и хранения с запоминанием двух уровней напряжения на конденсаторах с последующим вычитанием одного из другого. Данное устройство является неотъемлемой частью специализированных видеопроцессоров, предназначенных для обработки сигналов ПЗС-фотоприемников, например, таких как AD9826 производства «Analog Devices» или VSP3100 производства «Texas Instruments». Меж-

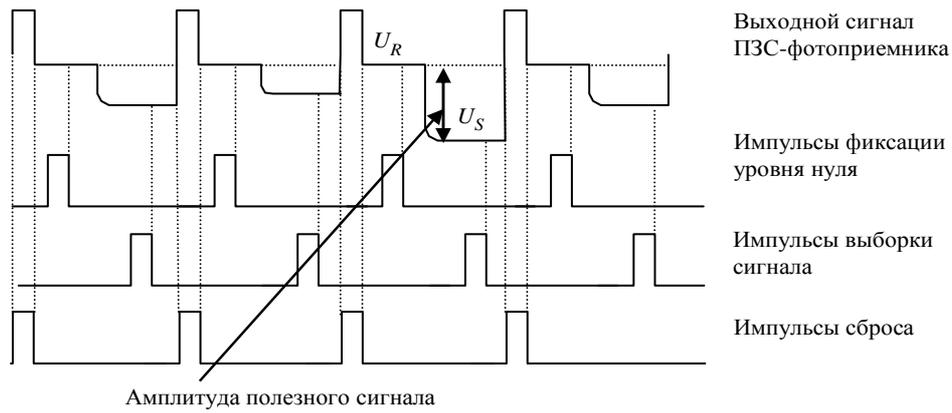


Рис. 1

ду тем прогресс микропроцессорной техники, связанный в первую очередь со значительным повышением производительности, а также доступность быстродействующих 14–16-разрядных АЦП позволяет построить цифровую двойную коррелированную выборку для обработки сигналов линейных ПЗС. Частота вывода информации в таких фотоприемниках, по сравнению с матричными ПЗС, не очень велика и составляет единицы мегагерц, что также упрощает задачу. Для реализации такой цифровой ДКВ необходимо для каждого пикселя осуществить следующие операции:

- с помощью АЦП преобразовать в цифровой код уровень нуля;
- с помощью АЦП преобразовать в цифровой код уровень сигнала;
- вычесть одно значение из другого для получения значения амплитуды полезного сигнала.

Очевидное преимущество данного подхода связано с использованием более дешевого и распространенного АЦП общего применения по сравнению со специализированным видеопроцессором. Однако имеется еще одно обстоятельство, связанное с особенностями выходного сигнала некоторых линейных ПЗС-фотоприемников. Например, у популярного линейного ПЗС TCD1304 производства «Toshiba», используемого во многих спектрофотометрах, в выходном сигнале отсутствует уровень нуля. Внутри данного фотоприемника собственная ДКВ также отсутствует.

Уровень нуля, зависящий от температуры и времени накопления, может быть получен с нескольких первых пикселей, закрытых металлом и нечувствительных к внешней засветке. При этом «классическая» аналоговая ДКВ с ПЗС-фотоприемниками подобного типа не может быть использована, поскольку за время регистрации всех пикселей уровень напряжения нуля на конденсаторе с первого пикселя неминуемо изменится. В этом случае алгоритм работы цифровой ДКВ будет следующим:

- с помощью АЦП преобразовать в цифровой код уровень сигнала с первого пикселя и присвоить полученное значение уровню нуля;
- далее для всех последующих пикселей с помощью АЦП преобразовать в цифровой код уровень сигнала;
- для всех последующих пикселей вычесть значение уровня нуля из значения уровня сигнала для получения амплитуды полезного сигнала.

Полученные значения уровня сигнала соответствуют однократному отсчету, аналогичному значению, полученному с использованием аналоговой ДКВ. Между тем цифровые методы обработки сигналов позволяют дополнительно снизить влияние других, не флуктуационных шумов, также присутствующих в выходном сигнале. В первую очередь это шумы, связанные с функционированием дополнительных управляющих генераторов и преобразователей напряжения, расположенных

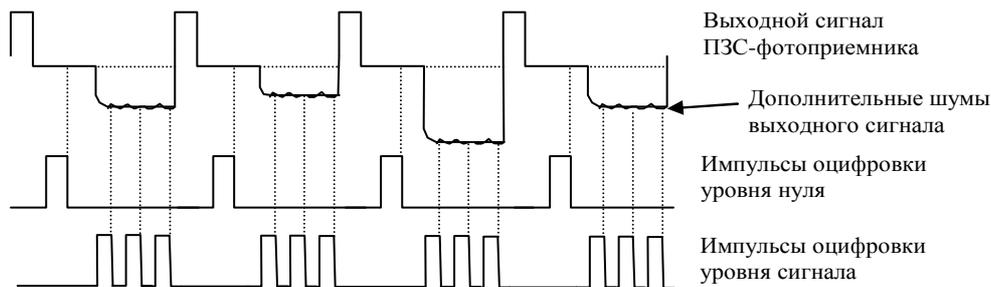


Рис. 2

непосредственно на кристалле линейных ПЗС-фотоприемников. Данные шумы при однократной выборке не компенсируются и вносят ошибку в полученное значение уровня сигнала. Цифровая ДКВ в отличие от аналоговой позволяет оцифровывать каждый пиксель несколько раз (рис. 2).

При многократной оцифровке каждого пикселя появляется возможность провести дополнительную цифровую обработку для снижения уровня шумов данного типа. В простейшем случае итоговое значение амплитуды сигнала пикселя может быть вычислено как среднее арифметическое всех оцифровок. Увеличение количества оцифровок каждого пикселя должно привести к снижению уровня регистрируемого шума, но при этом также возрастает нагрузка на микроконтроллер, поскольку необходимо производить достаточно много вычислений в ограниченный промежуток времени. За 1 мкс при частоте тактирования пикселей 1 МГц требуется сложить несколько значений отсчетов и поделить итоговую величину на количество отсчетов.

Цифровая ДКВ была реализована в модифицированном спектрометре ISM3600, разработанном на кафедре электронных приборов и устройств СПбГЭТУ «ЛЭТИ» [7]. В данном спектрометре в качестве фотоприемника используется ПЗС-линейка TCD1304 [8], а регистрация и анализ сигналов производятся с помощью программного обеспечения (ПО) Aspect2010 [9]. Анализ уровня шумов проводился с использованием имеющихся в данном ПО функций статистической обработки информации. Основная использованная функция – это усреднение по нескольким спектрам (полным кадрам с ПЗС-линейки) с накоплением максимального и минимального значений в выборке спектров по каждому пикселю. На рис. 3 представлены два фрагмента сигнала, включающего в себя результаты усреднения по 100 кадрам (распределение интенсивности  $I$  максимумов 1, распределение минимумов 3 и среднее по всем кадрам 2). Поскольку ПО изначально разрабатывалось для обработки спектральных данных, то на оси абсцисс отложена длина волны  $\lambda$ , при этом отрезку в 1 нм соответствует примерно 10 пикселей ПЗС. На оси ординат представлен уровень сигнала в процентах от максимального. Фрагмент, приведенный на рис. 3, а, соответствует однократной выборке на пиксель, фрагмент на рис. 3, б соответствует состоянию с тремя выборками на пиксель и последующим усреднением.

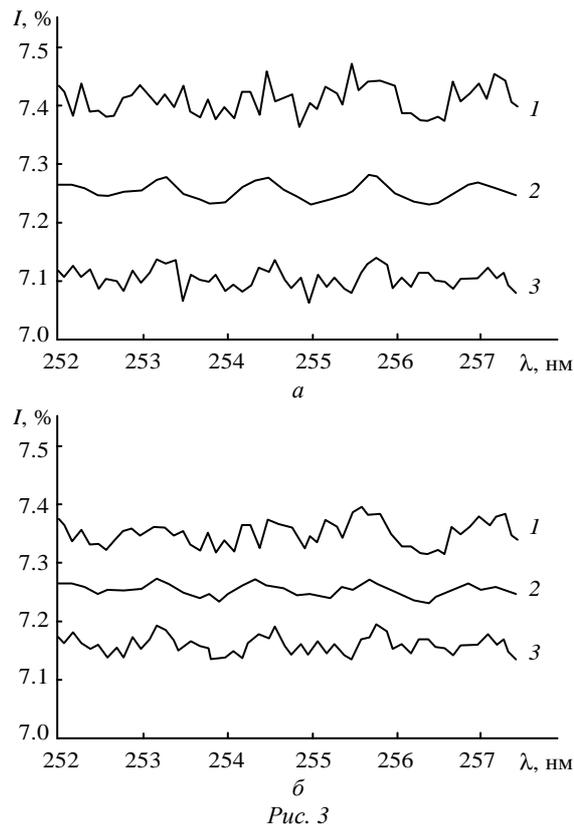


Рис. 3

Анализ сигналов проводился при времени накопления заряда в ПЗС 0.1 с. По распределению максимумов и минимумов в итоговой выборке вычислялась разность между ними в 8 соседних пикселях, которые затем также усреднялись, что и давало итоговую усредненную амплитуду шумовой составляющей (табл. 1).

Таблица 1

$I, \%$	№ пикселя							
	200	201	202	203	204	205	206	207
$I_{\max}$	7.66	7.70	7.66	7.67	7.62	7.62	7.64	7.65
$I_{\min}$	7.35	7.35	7.36	7.32	7.29	7.27	7.30	7.31
$I_{\max-\min}$	0.31	0.35	0.30	0.35	0.33	0.35	0.34	0.34

В системе управления ПЗС-фотоприемника используется микроконтроллер ARM Cortex M3 типа LPC1756, что позволяет достаточно оперативно менять количество оцифровок на один пиксель, однако получить более 5 при частоте вывода пикселей 1 МГц не представляется возможным. В табл. 2 представлены результаты измерения амплитуды шумовой составляющей для различного количества оцифровок одного пикселя с последующим усреднением.

Таблица 2

Количество оцифровок пикселя	1	3	4	5
Среднее значение	0.33	0.24	0.23	0.21
$I_{\max-\min}, \%$				

Паспортное значение динамического диапазона использованного в спектрометре ПЗС составляет 300, что предполагает уровень шумовой составляющей сигнала  $1/300 = 0.33\%$ . Данное значение было получено при стандартной однократной оцифровке каждого пикселя. Полученное в результате дополнительной цифровой обработки по пяти оцифровкам значение шумовой составляющей  $0.21\%$  означает повышение динамического диапазона до 476, т. е. его увеличение более чем в 1.5 раза. Возможно, что использование более сложных алгоритмов обработки сигнала позволит еще больше повысить динамический диапазон, однако производительности используемого микроконтроллера для этого уже недостаточно, а применение более быстродействующего микроконтроллера значительно усложнит систему и будет экономически не оправданным.

Как видно из результатов измерений, применение цифровой ДКВ с многократной оцифровкой каждого пикселя и вычислением среднего арифметического значения позволяет заметно снизить амплитуду шумовой составляющей сигнала, повысив тем самым динамический диапазон сигнала линейного ПЗС-фотоприемника до полутора раз. В свою очередь, повышение динамического диапазона увеличивает точность измерений, проводимых с помощью приборов, использующих линейные ПЗС-фотоприемники [10]. Следует также отметить, что модификация прибора практически не требует дополнительных затрат на компоненты и осуществляется исключительно за счет модификации программного обеспечения управляющего микроконтроллера.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колгин Е. А., Ухов А. А., Савушкин А. В. Спектрометры на основе полихроматора и одномерной ПЗС-матрицы: опыт разработки и применения // Петерб. журн. электроники. 2008. № 2–3. С. 120–126.
2. Спектрометрическое устройство для идентификации пород древесины / Е. А. Колгин, А. А. Ухов, А. А. Воронин и др. // Петерб. журн. электроники. 2008. № 2–3. С. 116–119.
3. Воронин А. А., Герасимов В. А., Кострин Д. К. Модернизация приборов и методики спектральной идентификации пород древесины // Биотехносфера. 2013. № 3. С. 16–20.
4. Василевский А. М., Коноплев Г. А., Светлов Д. А. Оптико-электронная информационно-измерительная система контроля дезинфицирующих средств на основе полигексаметиленгуанидина // Медицинская техника. 2014. № 1. С. 10–13.
5. Кострин Д. К., Ухов А. А. Метод контроля пространственного распределения световых и цветовых характеристик излучения светодиодов // Контроль. Диагностика. 2014. № 2. С. 65–68.
6. Пресс Ф. П. Фоточувствительные приборы с зарядовой связью. М.: Радио и связь, 1991. 261 с.
7. Комлев А. Е., Ухов А. А., Комлев А. А. Комплекс требований к оборудованию для осаждения плёнок оксидов методом реактивного магнетронного распыления // Вакуумная техника и технология. 2012. Т. 22, № 4. С. 245–248.
8. Ухов А. А., Кострин Д. К. Оптимизация системы регистрации многоканального оптического спектрометра // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2013. № 4. С. 8–12.
9. Повышение точности и воспроизводимости результатов колориметрических измерений светоизлучающих диодов / Р. В. Юдин, Д. К. Кострин, Д. И. Шишов, А. А. Ухов // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2013. № 3. С. 8–13.
10. Кострин Д. К., Ухов А. А. Интерференция в поверхностном слое и метрологические параметры спектрометров с ПЗС-фотоприемниками // Датчики и системы. 2013. № 5. С. 13–15.

A. A. Uhov

Saint-Petersburg state electrotechnical university «LETI»

## APPLICATION OF THE DIGITAL CORRELATED DOUBLE SAMPLING FOR SIGNAL PROCESSING OF THE LINEAR CCD SENSOR

*Digital correlated double sampling method for the linear charge coupling device signal processing is considered. Possibility of the charge coupling device signal noise level decreasing by statistical processing of the repeated digitization of each pixel is shown.*

**Charge coupled device, correlated double sampling, optical spectrometer**