

**СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА**

М 509

P10-87-516

А.Л.Меньшиков, В.Н.Поляков, В.И.Приходько

**ОДНОСТРОЧНАЯ ТЕЛЕВИЗИОННАЯ ПЗС-КАМЕРА
И ЕЕ ШУМОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ**

1987

Авторами разработана на основе линейного фоточувствительного прибора с зарядовой связью /ПЗС-линейки/ К1200ЦЛ2^{1/} однострочная камера^{4/}, предназначенная для преобразования одномерного изображения в цифровую форму с целью дальнейшей обработки его на ЭВМ. Структурная схема камеры представлена на рис.1. Конструктивно интерфейс ПЗС-линейки и сама линейка размещены в непосредственной близости друг к другу в оптическом узле, который служит для формирования двух одинаковых изображений: одного - на фоточувствительной поверхности линейки и другого - в фокальной плоскости окуляра. Окуляр оптического узла имеет юстировочную марку в виде отрезка прямой. Юстировочная марка оптически совмещена с фоточувствительным регистром линейки и служит для контроля преобразуемого изображения. Оптический узел имеет стандартное посадочное место для крепления объектива. Благодаря небольшим размерам оптического узла, его можно расположить в удобном для наблюдения за объектом месте. Все остальные схемы однострочной камеры /рис.1/ размещены в корзине, соединенной с оптическим узлом многожильным кабелем длиной 1,5 м.

Интерфейс ПЗС-линейки предназначен для обеспечения необходимого для линейки электрического режима. В интерфейсе формируются стабилизатором МАА723 и резистивными делителями ряд стабилизированных напряжений и с помощью преобразователей К170АПЗ вырабатываются управляющие импульсы с уровнями напряжений $U_0 \leq 0,45 \text{ В}$ и $10,5 \text{ В} \leq U_1 \leq 11,5 \text{ В}^{2/}$. В оптическом узле не удалось разместить всю схему обработки видеосигнала из-за ее сложности. Это связано с тем, что регистры сдвига линейки являются ПЗС-структурами с поверхностным каналом

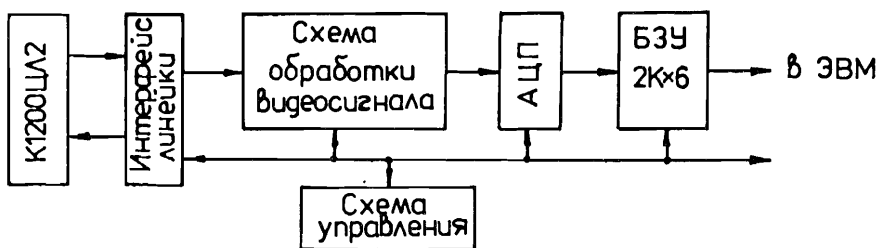


Рис.1. Структурная схема однострочной камеры.

и для их нормальной работы требуется так называемый "непустой ноль", представляющий собой фоновый сигнал, равный $10 \pm 30\%$ от уровня насыщения линейки /в однострочной камере "непустой ноль", формировался путем электрической инжекции/. Поэтому при обработке слабых сигналов необходимо сначала произвести вычитание из видеосигнала уровня черного, равного сумме среднего значения темного сигнала и непустого нуля, а затем - усиление. Так как линейка K1200ЦЛ2 является двухрегистровой и величины уровня черного в ее регистрах, вообще говоря, неодинаковы, для обработки видеосигнала необходимы два идентичных тракта.

На рис.2 представлена функциональная схема тракта обработки видеосигнала для одного из регистров линейки. Выходной сигнал линейки через повторитель, размещенный в интерфейсе, по экранированному кабелю поступает на схему двойной коррелированной выборки /ДКВ/, реализованную на дискретных компонентах и операционном усилителе. Коэффициент усиления ДКВ равен двум. Использование ДКВ обеспечивает не только понижение шума, вносимого узлом привязки^{5/} выходного устройства линейки, но и повышение помехоустойчивости линии передачи видеосигнала из оптического узла.

Видеосигнал с выхода схемы ДКВ поступает на дифференциальный усилитель ДУ, который осуществляет основное усиление видеосигнала. Этот же усилитель с помощью схемы компенсации уровня черного /СКЧ/ производит вычитание из видеосигнала уровня черного. Для этого во время вывода видеосигнала с 48 закрытых от света фотодиодов, расположенных в начале ПЗС-линейки, схема компенсации уровня черного, управляемая цифровым компаратором /КМП/, заряжает конденсатор уровня черного С до такой величины, чтобы входной сигнал АЦП разместился в диа-

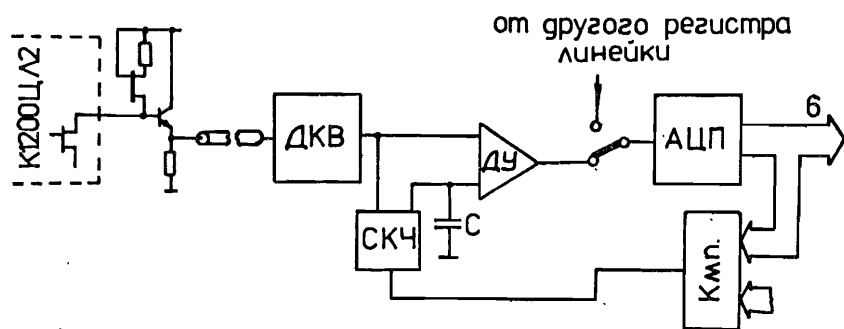


Рис.2. Функциональная схема тракта обработки видеосигнала.

пазоне измерения и выходной код АЦП был бы равен коду уровня черного, установленному на входе компаратора.

Оцифровка видеосигналов с обоих регистров выполняется одним преобразователем K1107ПВ1, на вход которого аналоговый коммутатор /К/ в каждом такте сдвига ПЗС-линейки поочередно подключает усиленные видеосигналы. Оцифрованное изображение записывается в буферное запоминающее устройство БЗУ /рис.1/ емкостью 2Кх6 бит, откуда оно может быть считано через параллельный регистр в ЭВМ.

В измерительном устройстве на основе однострочной ПЗС-камеры основная задача, возлагаемая на ЭВМ, - это обнаружение объектов и измерение их координат. Для успешного решения этой задачи важно располагать как можно большей информацией об изображении объекта и об искажениях, которым оно подвергалось в однострочной камере при преобразовании в цифровую форму. Основные искажения в однострочной камере вносятся самим датчиком - линейкой ПЗС и аналого-цифровым преобразователем при квантовании видеосигнала. Существует четыре типа различных по характеру искажений, вносимых ПЗС-датчиками. Это аддитивный темновой сигнал, неравномерность чувствительности, неэффективность переноса и хаотический шум. Первые два искажения могут быть устранены путем калибровки передаточной характеристики камеры. Для этого необходимо создать массив оценки темного сигнала, усреднив несколько его реализаций, и массив калибровочных коэффициентов светочувствительности. Искажения, вызванные неэффективностью переноса, можно устранить с помощью линейной фильтрации, зная значение неэффективности переноса. Неэффективность переноса лучше всего измерять путем электрической инжекции единичных зарядовых пакетов в каждый сдвиговой регистр ПЗС-линейки и последующих их измерений на выходах регистров. В однострочной камере длительность кадра ПЗС-линейки установлена на 24 такта больше длительности, необходимой для считывания всей линейки. Во время этих "лишних" тактов и производится измерение инжектированных единичных зарядовых пакетов /емкости БЗУ, равной 2К слов, как раз достаточно для промежуточного хранения 2000 кодов изображения и 48 слов, соответствующих дополнительным тактам/.

Аддитивный темновой сигнал и неэффективность переноса не являются постоянными во времени, поэтому требуется периодическая калибровка. Период калибровки определяется температурным дрейфом, для темного сигнала он равен приблизительно $10 \pm 15\%/^{\circ}\text{C}$, а для неэффективности переноса, согласно теории^{3/}, равен $0,4\%/^{\circ}\text{C}$ /проведенные эксперименты показали, что в лабораторных условиях $/25 \pm 5/^{\circ}\text{C}$ изменение неэффективности

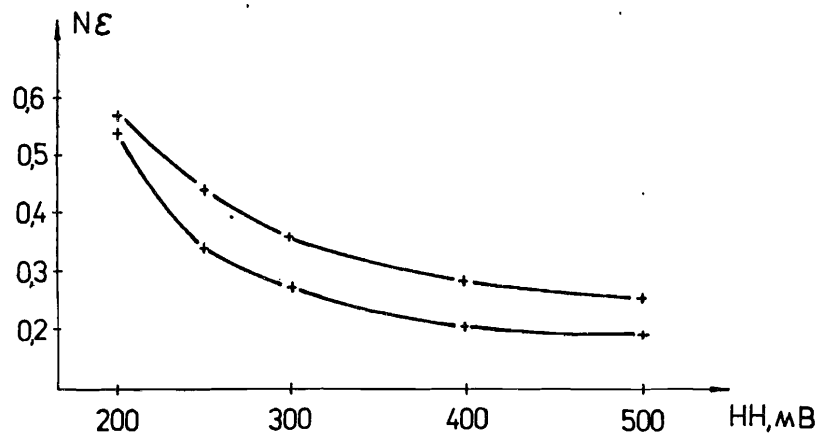


Рис. 3. Типичные зависимости неэффективности переноса K1200ЦЛ2 от величины "непустого нуля".

переноса не превышает $\pm 2\%$. Неэффективность переноса зависит также от величины "непустого нуля"; типичные для K1200ЦЛ2 кривые зависимости неэффективности переноса от уровня не-пустого нуля представлены на рис. 3.

Предельно достижимые точностные характеристики измерительных устройств на ПЗС определяются хаотическим шумом, вносимым при преобразовании изображения. Хаотический шум однострочной камеры имеет аддитивную и зависящую от фотосигнала составляющие. Экспериментально был исследован закон распределения аддитивного шума. Для этого усиление тракта обработки видеосигнала устанавливалось таким, чтобы разброс шума составлял $15 \div 20$ дискрет АЦП, и для нескольких произвольно выбранных ячеек на растре было проведено гистограммирование разностей амплитуды их сигналов и среднего значения амплитуды, взятого по всем 2000 ячейкам линейки. Полученные гистограммы оказались симметричными, а аппроксимация их распределением экспоненциального типа $\beta \cdot e^{-x/\alpha}$ дала значение показателя α , равное 1,4. Значит, распределение шума является "средним" между распределениями Гаусса ($\alpha = 2$) и Лапласа ($\alpha = 1$). Была проведена проверка по критерию χ^2 двух гипотез. При уровне значимости 1% гипотеза о распределении Лапласа была отвергнута и с вероятностью 90% принята гипотеза о распределении Гаусса. По 1000 реализациям шумового процесса были измерены также среднеквадратичное отклонение шума и его корреляционные коэффициенты /табл.1/. Оказалось, что аддитивный хаотический шум однострочной камеры не является стационарным случайным процессом, так как дисперсия и корреляция шума зависят от номера элемента ПЗС /четный или нечетный/.

Таблица 1

Суммарный шум однострочной камеры

Ячейки ПЗС	S, мВ	$\rho(1)$	$\rho(2)$
Четные	0,6	0	-0,3
Нечетные	0,55	0,15	-0,25

Хаотический шум ПЗС-камеры имеет ряд различных источников происхождения, их вклад можно оценить с помощью анализа результатов некоторых простых экспериментов. Измерения шума тракта обработки видеосигнала проводились при подключении ко входу тракта обработки вместо выходов ПЗС-линейки эквивалентных резисторов с сопротивлением $3 \text{ кОм}^{4/}$. Оказалось, что шум тракта обработки не является стационарным и что именно он порождает ненулевой коэффициент корреляции $\rho(1)$ в суммарном шуме /табл.1/. Положительная величина $\rho(1)$ для нечетных элементов объясняется прохождением одних и тех же импульсов управления ПЗС-линейки как в видеосигнал с нечетного элемента, так и в видеосигнал четного, номер которого на единицу больше, так как оба эти видеосигнала выводятся из ПЗС-линейки и обрабатываются одновременно. Среднеквадратичное отклонение шума тракта обработки видеосигнала равно приблизительно $0,2 \div 0,3$ мВ; сравнив его с суммарным шумом /табл.1/, можно заключить, что основной вклад в хаотический шум вносится ПЗС-линейкой. Известно, что шум фоточувствительных ПЗС-приборов состоит из шума переноса, генерационного шума, шума электрической инжекции и шума выходного узла^{5/}. При отсутствии непустого нуля и малой величине темного сигнала первые три составляющие шума "интегрируются" неэффективностью переноса и шум линейки равен шуму выходного узла, среднеквадратичное отклонение которого приблизительно равно 0,2 мВ. Единственной составляющей суммарного шума, имеющей отличный от нуля коэффициент корреляции $\rho(2)$, является шум переноса / $\rho(2)$ для него равно $0,5^{5/}$ /. Так как все составляющие суммарного шума независимы, то нетрудно найти величины шума переноса; его среднеквадратичное отклонение равно приблизительно 0,4 мВ.

Для измерения генерационного шума длительность кадра накопления была увеличена до 0,5 с. Среднеквадратичное отклонение генерационного шума оказалось равным $0,6 \div 0,8$ мВ при величине сигнала, равной 0,5 В. Так как генерационный шум пропорционален корню квадратному из количества сгенерированных

Таблица 2

Составляющие хаотического шума

Составляющие суммарного шума	Среднеквадратичное отклонение $S, \text{мВ}$
Шум переноса	0,4
Шум выходного узла	0,2
Генерационный шум /при сигнале 0,5 В/	$0,6 \div 0,8$
Шум тракта обработки	$0,2 \div 0,3$

носителей, а амплитуда сигнала - количеству носителей^{/3/}, то можно найти связь между количеством носителей и напряжением на выходе ПЗС-линейки: насыщению линейки K1200ЦЛ2 соответствует $3 \div 5,5 \cdot 10^6$ носителей.

В однострочной ПЗС-камере производится оцифровка видеосигнала, которая приводит к появлению еще одной составляющей шума - шума квантования. Вклад шума квантования в суммарный шум камеры зависит от коэффициента усиления тракта обработки видеосигнала. В^{8/} показано, что целесообразно устанавливать усиление тракта обработки таким, чтобы среднеквадратичное отклонение суммарного шума на входе АЦП было равно приблизительно третьей части величины одного кванта. Так как среднеквадратичное отклонение шума ПЗС-линейки приблизительно равно 0,6 мВ, а насыщение линейки наступает при 4 В, то для полного использования динамического диапазона ПЗС-линейки требуется АЦП с 11 разрядами. В однострочной камере применен АЦП с меньшим количеством разрядов /6 бит/, поэтому для обеспечения возможности работы во всем динамическом диапазоне предусмотрена регулировка усиления тракта обработки видеосигнала в диапазоне от 2 до 30.

Результаты измерений составляющих суммарного шума однострочной камеры приведены в табл.2. Из проведенных исследований следует, что основной вклад в шум однострочной камеры вносят шум переноса и генерационный шум ПЗС-линейки, поэтому дальнейшее совершенствование схемы камеры /усилителя и линии передачи видеосигнала/ может привести к уменьшению суммарного шума камеры не более чем на 15%. Это значит, что описанная в работе конструкция камеры с компактным оптическим узлом, содержащим ПЗС-линейку и ее интерфейс, вполне пригодна для построения высокоточных измерительных устройств и систем.

В настоящее время однострочная камера используется для измерения топографии роговицы глаза путем непосредственной /без фиксации изображения на фотопленку/ регистрации измерительных марок кератометра^{/7/}. Были проведены экспериментальные исследования^{/8/} прибора, построенного на базе однострочной камеры и предназначенного для измерения координат изображений точечных объектов. При полуширине точечного изображения, равной $2 \div 3$ элементам, и отношении сигнал/шум (амплитудном), равном 50, среднеквадратичное отклонение ошибки измерения координаты составило 4% от расстояния между элементами линейки /т.е. приблизительно 0,4 мкм/.

ЛИТЕРАТУРА

1. Василевская Л.М. и др. Линейная фоточувствительная схема с зарядовой связью K1200ЦЛ2. М.: Электронная промышленность, 1982, № 7.
2. Кисслинг Х. и др. ОИЯИ Р10-85-550, Дубна, 1985.
3. Носов Ю.Р., Шилин В.А. Основы физики приборов с зарядовой связью. М.: Наука, 1986.
4. Кисслинг Х. и др. ОИЯИ Б2,10-85-518, Дубна, 1985.
5. Секен К., Томпсет М. Приборы с переносом заряда. М.: Мир, 1978.
6. Обработка изображений и цифровая фильтрация. /Под ред. Хуанга Т./ М.: Мир, 1979.
7. Киваев А.А. и др. ОИЯИ 5-84-509, Дубна, 1984.
8. Меньшиков А.Л. и др. ОИЯИ Р10-87-515, Дубна, 1987.

Рукопись поступила в издательский отдел
7 июля 1987 года.

НЕТ ЛИ ПРОБЕЛОВ В ВАШЕЙ БИБЛИОТЕКЕ?

Вы можете получить по почте перечисленные ниже книги, если они не были заказаны ранее.

Д7-83-644	Труды Международной школы-семинара по физике тяжелых ионов. Алушта, 1983.	6 р.55 к.
Д2,13-83-689	Труды рабочего совещания по проблемам излучения и детектирования гравитационных волн. Дубна, 1983.	2 р.00 к.
Д13-84-63	Труды XI Международного симпозиума по ядерной электронике. Братислава, Чехословакия, 1983.	4 р.50 к.
Д2-84-366	Труды 7 Международного совещания по проблемам квантовой теории поля. Алушта, 1984.	4 р.30 к.
Д1,2-84-599	Труды VII Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1984.	5 р.50 к.
Д10,11-84-818	Труды V Международного совещания по проблемам математического моделирования, программированию и математическим методам решения физических задач. Дубна, 1983.	3 р.50 к.
Д17-84-850	Труды III Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1984. /2 тома/	7 р.75 к.
Д11-85-791	Труды Международного совещания по аналитическим вычислениям на ЭВМ и их применению в теоретической физике. Дубна, 1985.	4 р.00 к.
Д13-85-793	Труды XII Международного симпозиума по ядерной электронике. Дубна, 1985.	4 р.80 к.
Д4-85-851	Труды Международной школы по структуре ядра. Алушта, 1985.	3 р.75 к.
Д3,4,17-86-747	Труды V Международной школы по нейтронной физике. Алушта, 1986.	4 р.50 к.
	Труды IX Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1984. /2 тома/	13 р.50 к.
Д1,2-86-668	Труды VIII Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1986. /2 тома/	7 р.35 к.
Д9-87-105	Труды X Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1986. /2 тома/	13 р.45 к.
Д7-87-68	Труды Международной школы-семинара по физике тяжелых ионов. Дубна, 1986	7 р.10 к.
Д2-87-123	Труды Совещания "Ревормгруппа-86". Дубна, 1986	4 р.45 к.

Заказы на упомянутые книги могут быть направлены по адресу: 101000 Москва, Главпочтамт, п/я 79. Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований.

Меньшиков А.Л., Поляков В.Н., Приходько В.И. P10-87-516
Однострочная телевизионная ПЗС-камера
и ее шумовые характеристики

Сконструирована однострочная телевизионная камера на основе ПЗС-линейки K1200CL2, предназначенная для координатных измерений. Описаны особенности конструкции камеры. Проанализированы искажения, вносимые схемами камеры при преобразовании изображения в цифровую форму. Приведены результаты исследований хаотичных шумов камеры.

Работа выполнена в Лаборатории вычислительной техники и автоматизации ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1987

Перевод О.С.Виноградовой

Menshikov A.L., Polyakov V.N., Prikhodko V.I. P10-87-516
The Linear CCD-Camera
and Its Noise Characteristics

A CCD-camera based on a linear 2000-elements charge-coupled light sensor K1200CL2 has been designed. Construction of the camera is described. Distortion brought to a digital image by the camera are analysed. Results of investigations of camera random noises are presented.

The investigation has been performed at the Laboratory of Computing Techniques and Automation, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1987