

Ю. В. БОНДАРЕНКО, В. Я. БУДЦЕВ, А. Н. КАСПЕРОВИЧ
(Новосибирск)

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ РЕГИСТРАЦИИ ДВУМЕРНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ СУПЕРВИДИКОНА ЛИ-702

В [1] дано описание автоматизированного многоканального регистратора оптических спектров, в котором в качестве приемника изображения использовалась высокочувствительная телевизионная передающая ЭЛТ с кремниевой мишенью — супервидикон ЛИ-702. Там же представлены предварительные сведения о возможностях системы. В ходе дальнейших исследований предпринято более детальное изучение работы ЭЛТ в условиях малой интенсивности входного изображения. Система модернизирована с целью возможности регистрации двумерных изображений. Если в [1] запись регистрограмм производилась непосредственно в ОЗУ мини-ЭВМ «Электроника 60» через стандартное устройство прямого доступа к памяти, что было оправдано для небольшого по объему данных регистратора спектров, то в данном варианте система дополнена буферной памятью емкостью 16 Кбайт. Описанию полученных результатов и краткой характеристике модернизированной системы и посвящена настоящая работа.

Основными узлами системы регистрации, общая структура которой представлена на рис. 1, являются специализированная телевизионная передающая камера (сканер), блок управления, скоростное оперативное запоминающее устройство (СОЗУ) и аналого-цифровой преобразователь (АЦП). Для управления регистратором, обработки данных и контроля за ходом эксперимента в состав системы включен комплекс МERA-60 — КАМАК на основе мини-ЭВМ «Электроника 60» с набором внешних устройств — дисплей, печатающее устройство, внешняя память на гибких магнитных дисках, крейт КАМАК с крейт-контроллером типа 106 А. Кроме этого комплекса в системе использованы два стандартных телевизионных монитора: один для контроля исследуемого изображения на выходе телевизионной камеры и другой для визуализации заданного сечения изображения. Последний управляется модулем КАМАК «Привод телевизора» [2]. Этот модуль позволяет выводить на экран графики (или другое бинарное изображение) с разрешением 256×384 точки. Блок управления, СОЗУ, 8-разрядный АЦП выполнены в виде отдельных модулей КАМАК. Для повышения быстродействия обмен данными и некоторыми управляющими сигналами между блоком управления, СОЗУ и АЦП производится по дополнительным линиям связи, минуя магистраль КАМАК.

Сканер на основе супервидикона ЛИ-702 подробно описан в [1], по сравнению с предыдущим вариантом регистратора он не претерпел существенных изменений.

Восьмиразрядный АЦП, выполненный на микросхеме 1107ПВ2, выдает отсчеты на видеосигнале с частотой дискретизации 10 МГц. Таким образом, кадр считывания преобразуется в массив данных 512×512 8-разрядных слов, и естественно было бы иметь СОЗУ такого же формата. Однако в тех случаях, когда исследуемое изображение занимает часть кадра или не требуется очень высокого пространственного разрешения, можно использовать СОЗУ меньшего объема, дополнив блок управления программируемым полем записи фрагмента кадра. В этом случае в СОЗУ записывается только выделенная часть кадра. Для удобства контроля фрагмент кадра, выбранный для записи в СОЗУ, может быть выделен на контрольном ТВ-мониторе вместе с исходным изображением.

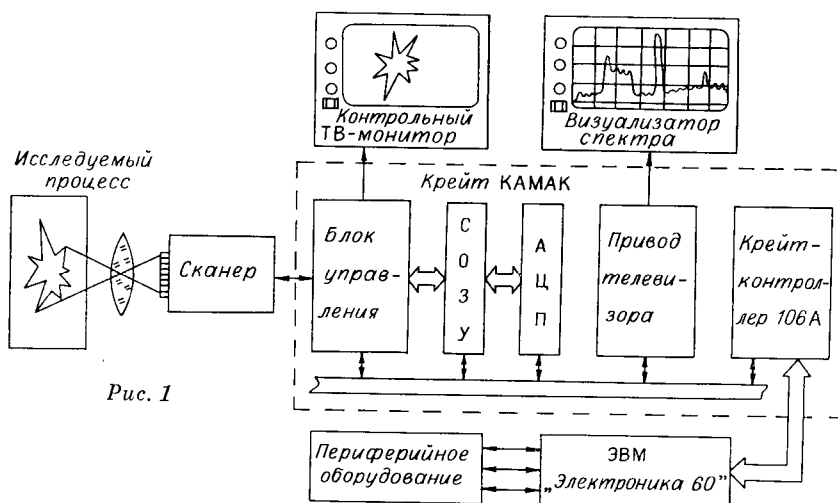


Рис. 1

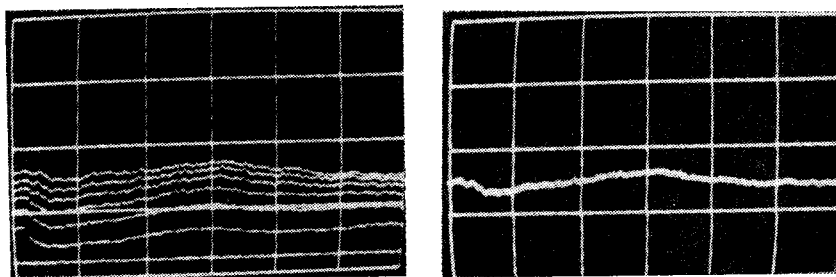
Модуль памяти (СОЗУ) содержит контроллер, управляющий работой модуля, интерфейс связи с магистралью КАМАК и собственно ОЗУ емкостью 16 К 8-разрядных слов. Контроллер включает в себя два порта «Ввод — вывод» и схему регенерации памяти. Через быстрый первый порт осуществляются запись данных после АЦП конвейерным методом и вывод содержимого ОЗУ на контрольный ТВ-монитор. Время доступа к ячейке памяти через этот порт составляет 400 нс. Регенерация памяти производится во время обратного хода телевизионной строки. В ОЗУ можно записать либо весь телевизионный кадр с разрешением 128×128 отсчетов, либо предварительно выбранный фрагмент кадра. В последнем случае в направлении строчной развертки возможен выбор от 1 до 128 отсчетов, в направлении кадровой — от 1 до 512, однако общее число отсчетов по кадру не должно превышать емкости ОЗУ — 16 Кбайт. Через второй порт происходит обмен данными между ОЗУ и ЭВМ. Максимальное время доступа к ячейке ОЗУ через этот порт равно 1,6 мкс.

Блок управления осуществляет синхронизацию работы сканера, АЦП, СОЗУ и контрольного ТВ-монитора. Он формирует кадр считывания, позволяет по командам оператора выбрать фрагмент этого кадра, предназначенный для записи в СОЗУ. В блоке управления предусмотрен формирователь задержки, определяющий время, на которое луч видеоканона задерживается перед началом считывания. Это позволяет осуществлять накопление изображения на мишени ЭЛТ. Со стороны ЭВМ через КАМАК-магистраль доступны следующие регистры блока управления: регистр состояния блока управления; регистры задания фрагмента изображения, предназначенного для записи в СОЗУ; сервисный регистр, содержимое которого определяет число разрешаемых элементов в направлении кадровой развертки телевизионного кадра при записи в СОЗУ и указывает выбранный фрагмент записи на контрольном ТВ-мониторе; регистр времени накопления изображения на мишени; регистр диагностики сканера.

Запуск и работа системы регистрации могут осуществляться как по командам ЭВМ, так и по внешним синхроимпульсам, связанным с исследуемым процессом.

Для обеспечения работоспособности системы регистрации, тестирования ее отдельных блоков и проведения испытаний регистратора был составлен пакет прикладных программ. Основная часть программ написана на Макроассемблере.

Работа системы регистрации осуществляется следующим образом. После загрузки в память ЭВМ обслуживающих программ оператор в диалоговом режиме задает режимы работы регистратора — накопление сигнала на мишени супервидикона или в памяти ЭВМ, выбор фрагмента



«Привод телевизора» выводится на экран визуализатора спектров, причем можно выводить сразу несколько графиков. Полученные в результате испытаний данные в виде графиков и изображений фотографировались с экранов контрольного ТВ-монитора и визуализатора спектров. На приведенных ниже снимках с экрана визуализатора спектров полный размер по вертикали равен 256 отсчетам, что соответствует диапазону используемого для преобразования видеосигнала 8-разрядного АЦП. По горизонтали в этом случае выводится 384 отсчета из 512 (это определяется памятью модуля «Привод телевизора»).

Основной целью проведенных испытаний было определение возможностей регистратора на базе супервидикона ЛИ-702 при работе с оптическими изображениями малой интенсивности. Поэтому большое внимание уделено факторам, связанным с регистрацией слабых сигналов: накоплению изображения на мишени в течение нескольких кадров перед началом считывания, исследованию шумов (темновой ток мишени и шумы трактов усиления и считывания), стабильности этих шумов по полю мишени и во времени, цифровому накоплению в памяти ЭВМ и другим подобным вопросам.

Рассмотрим сначала факторы, связанные с работой системы в отсутствие светового потока на фотокатоде супервидикона. На рис. 2 показано изменение фонового сигнала по одному и тому же сечению мишени в зависимости от времени накопления (в понятие «фона» включаем пока все, что не есть полезный сигнал — темновой ток мишени, флуктуации в тракте усиления, шумы АЦП и т. п.). Сечение взято примерно посередине телевизионного кадра в направлении кадровой развертки. Время накопления составляло соответственно 0, 64, 128,, 384 кадра. Из этого рисунка видно, что амплитуда флуктуаций шума при увеличении времени накопления на мишени изменяется мало (не более чем вдвое при накоплении в течение 100 кадров). Случайная составляющая шума по полю остается примерно постоянной. Повторяемость флуктуаций фонового сигнала с мишени иллюстрируется рис. 3. На нем представлена совокупность кривых, соответствующих восьми реализациям накопления фонового сигнала по одному и тому же сечению мишени. Время накопления на мишени составляло 250 кадров (10 с). Напомним, что полный размер по вертикали равен 256 отсчетам. Видно, что повторяемость фонового сигнала при фиксированном времени накопления достаточно хорошая. Поэтому вычитанием накопленного фона влияние неоднородности мишени можно сделать малосущественным при временах накопления на мишени до сотни кадров (естественно, при этом сумма фона и сигнала не должна выходить за диапазон АЦП).

Интересным представляется сравнение цифрового накопления (суммирование в памяти ЭВМ данных, полученных при последовательных сканированиях) и аналогового накопления на мишени ЭЛТ. В качестве



Рис. 4

источника сигнала использовался светодиод, питание которого осуществлялось от источника постоянного напряжения. Участок спектра свечения светодиода проецировался на фотокатод супервидикона. На рис. 4, а показаны результаты цифрового накопления в течение одного, двух, трех и четырех кадров. Различные кривые рис. 4, б представляют результаты накопления на мишени супервидикона в течение от одного до одиннадцати кадров. Для корректной оценки результатов экспериментов необходимо вычитать не связанную с шумом постоянную составляющую сигнала, которая присутствует на этих графиках. Сравнение результатов цифрового и аналогового накоплений (при условии вычитания накопленного шума) иллюстрируется рис. 4, в. Более «гладкие» кривые — разность накоплений на мишени в течение 24 кадров с сигналом и без сигнала. Более «лохматые» кривые — то же при цифровом накоплении в памяти ЭВМ (суммирование последовательных сканирований). Флуктуации шума при аналоговом накоплении оказываются намного меньше, чем при цифровом (см. рис. 4, в). Это позволяет предположить, что значительная доля флуктуаций шума образуется при считывании сигнала с мишени, последующем усилении и преобразовании видеосигнала в цифровую форму. При аналоговом накоплении эти шумы добавляются один раз, а при цифровом — несколько раз (по числу сканирований). Таким образом, накопление сигнала на мишени повышает отношение сигнал/шум, и при регистрации световых потоков малой интенсивности более выгодным режимом оказывается накопление изображения на мишени, нежели суммирование последовательных сканирований в памяти ЭВМ.

Для определения оптимального режима накопления изображения на мишени ЭЛТ важно знать, как происходит растекание заряда по мишени после импульсной засветки фотокатода. В этом случае питание светодиода осуществлялось от генератора импульсов, длительность импульса была менее 100 мкс. На рис. 5, а приведены кривые, соответствующие сигналу с мишени при различных задержках начала сканирования — на 0, 32, 64, 96, 128 кадровых интервалов. Для большей наглядности при выводе на визуализатор кривые сдвинуты одна относительно другой (самая левая соответствует сигналу при непрерывном сканировании мишени, следующая — с задержкой начала сканирования на 32 кадра и т. д.). На рис. 5, б представлены три кривые: сигнал с шумом после задержки на 32 кадровых интервала, накопление шума в течение такого же времени и разность этих двух кривых. Из приведенных данных видно, что изменение исходной картинка на мишени во времени обусловлено скорее влиянием темновых токов мишени, приводящих к нарастанию фоновых сигналов, нежели перераспределением зарядов по площади мишени. Оценка приведенной к фотокатоду мощности шумов мишени при комнатной температуре дает величину порядка 10^{-10} Вт/см².

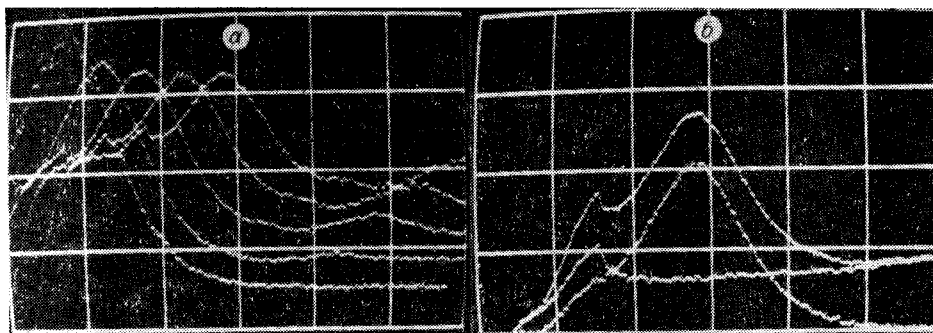


Рис. 5

Проследим весь путь преобразования полезного сигнала от исходного изображения до записи его в виде цифры в буферную память. Возможными источниками шума являются: фотокатод (флуктуации числа фотоэлектронов, попадающих на разрешаемый элемент изображения при низких уровнях входного сигнала); мишень (усиление сигнала в кремниевой мишени при попадании на нее ускоренных фотоэлектронов); считывающий луч и усилитель видеосигнала (флуктуации тока считывающего луча и шумы высокочувствительного входного усилителя); АЦП (шумы квантования, связанные с преобразованием видеосигнала в цифровую форму).

Результаты одного из экспериментов, направленного на выяснение источника шума, представлены на рис. 6. На рис. 6, *a* показан усредненный по 16 реализациям участок спектра светодиода с вычетом среднего шума и постоянной «подставки», на рис. 6, *б* — совокупность квадратов отклонений от среднего этих 16 реализаций. Эти данные позволяют утверждать, что узел АЦП не является основным источником шума, так как шумы квантования носят аддитивный характер, что противоречит рис. 6. Сравнение рис. 6, *a* и *б* дает основание предположить, что основная часть шумов связана с флуктуациями входного сигнала при малых уровнях освещенности и с шумами тракта усиления.

Для оценки шума, вносимого фотокатодом и кремниевой мишенью ЭЛТ, подсчитаем число фотоэлектронов, попадающих на один разрешаемый элемент изображения на мишени при средних уровнях освещенности фотокатода ($\sim 10^{-8}$ Вт/см²). С учетом эффективности фотокатода оно оказывается равным 2000. Отношение сигнал/шум при этом составляет $N/\sqrt{N} \approx 45$. При уровне освещенности 10^{-9} Вт/см² это отношение равно 15.

Следующий эксперимент был проведен для оценки минимально слабого сигнала, который можно зарегистрировать с помощью данной системы с использованием накопления изображения на мишени. В этом

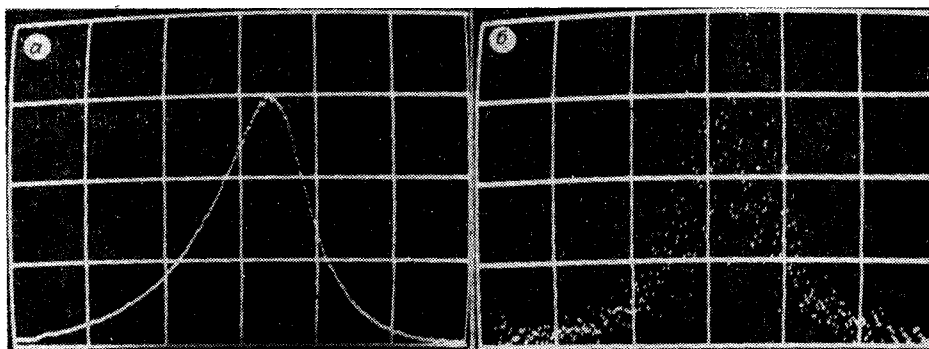


Рис. 6

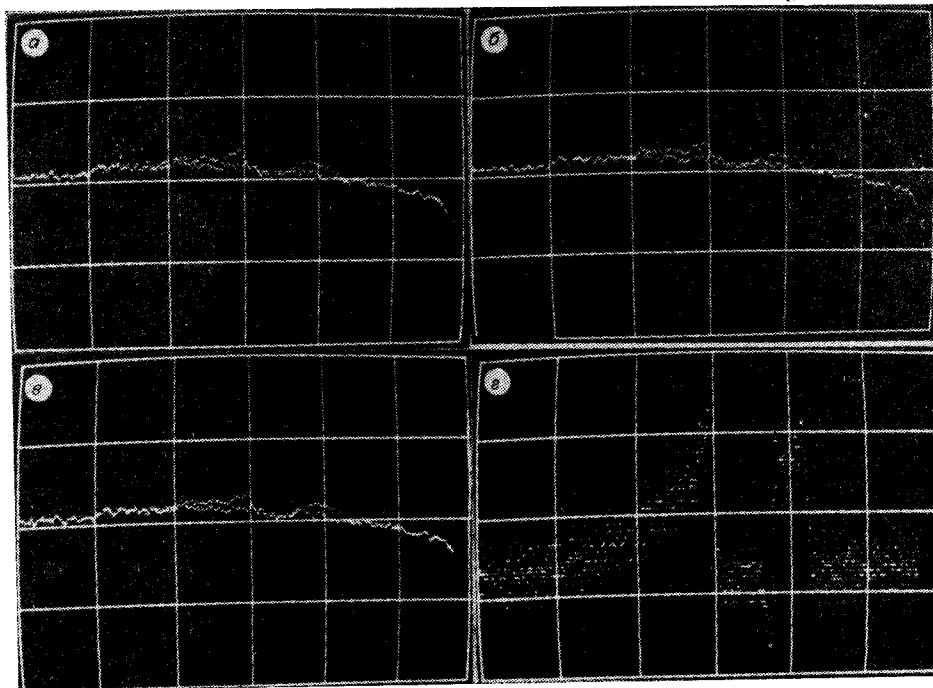


Рис. 7

эксперименте в качестве источника света использовался гелий-неоновый лазер. Падающий световой поток измерялся калориметром ИКТ-1Н. Ослабление светового потока производилось с помощью набора калиброванных светофильтров. На рис. 7, а — в приведены три независимые реализации накопления сигнала с шумом и шума в течение 128 кадров. На рис. 7, г показаны нормированные на (max — min) разности соответствующих кривых трех предыдущих реализаций, выведенные на один график. Интенсивность светового потока, падающего на фотокатод супервидикона, в этом эксперименте составляла $1,6 \cdot 10^{-11}$ Вт/см².

Сформулируем полученные выводы.

1. Фоновый сигнал с кремниевой мишени супервидикона по мере увеличения времени накопления становится существенно неоднородным по полю, однако его повторяемость при фиксированном времени накопления достаточно хорошая. Поэтому вычитанием накопленного фона влияние этой неоднородности можно сделать малосущественным при временах накопления на мишени до сотни кадров.

2. Случайная составляющая шума по полю мишени остается примерно постоянной и мало изменяется при увеличении времени аналогового накопления (не более чем вдвое при накоплении в течение 100 кадров).

3. Растекание заряда по мишени при накоплении слабых сигналов мало влияет на форму сигнала при временах накопления до 50 кадров. После импульсной засветки фотокатода растекание заряда по мишени происходит, по-видимому, с той же скоростью, что и накопление фона.

4. При регистрации световых потоков малой интенсивности более выгодным режимом оказывается накопление изображения на мишени, нежели суммирование последовательных сканирований в памяти ЭВМ, так как основная часть шумов связана с флуктуациями входного сигнала и шумами тракта усиления.

5. Накопление сигнала на мишени в течение 128 телевизионных кадров (~ 5 с) с последующим вычитанием шума позволило уверенно регистрировать сигнал, соответствующий входному световому потоку около 10^{-11} Вт/см² при $\lambda = 632,8$ нм.

В заключение авторы выражают признательность В. М. Ефимову за плодотворные дискуссии при постановке экспериментов и обсуждение результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бондаренко Ю. В., Будцев В. Я., Касперович А. Н., Прокопенко В. И. Автоматизированный многоканальный регистратор оптических спектров // Автометрия.— 1987.— № 3.
2. Золотухин Ю. Н., Якушев В. Я. Привод телевизора // Автоматизация научных исследований на основе применения ЭВМ: Тез. докл. Всесоюз. конф.— Новосибирск: ИАиЭ СО АН СССР, 1979.

Поступила в редакцию 29 июня 1987 г.

УДК 621.391.268 : 007.52

С. М. БОРЗОВ, И. С. ГИБИН, И. И. РАЗУМОВА, В. Н. ХУДИК

(Новосибирск)

АНАЛИЗ ПАРАЛЛЕЛЬНО-ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО МЕТОДА КОРРЕЛЯЦИОННЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ В ЗАДАЧЕ РАСПОЗНАВАНИЯ

В настоящее время известно большое число различных схемотехнических решений оптических корреляторов, предназначенных для решения задачи распознавания [1—5]. Достоинство таких корреляторов — высокая скорость вычисления корреляционной функции, обеспечиваемая параллельностью оптической обработки. Однако отсутствие гибкого оперативного формирования эталонного изображения (ЭИ) — быстрой смены ЭИ, его перебора по масштабу и ориентации — затрудняет их применение при решении большинства прикладных задач распознавания. Недостатком этих корреляторов является также необходимость перенормировки корреляционного поля при его пороговой обработке.

В данной работе анализируется параллельно-последовательный метод вычисления корреляционной функции, свободный от указанных недостатков [6]. Функциональные возможности этого метода естественным образом позволяют использовать априорную информацию о распознаваемых изображениях и тем самым повысить достоверность распознавания при наличии аппаратных шумов. В соответствии с этим методом распознаваемое изображение (РИ) $S_i(x, y)$ при проецировании с входной плоскости 1 (рис. 1) на плоскость накопителя 3 сдвигается как целое отклоняющим устройством 2 таким образом, что проекция начала координат плоскости 1 (точка $x = 0, y = 0$) в течение времени накопления T движется в плоскости 3 по некоторому закону $S_e(x, y) = x_e(t), y_e(t)$. Эталонное изображение $S_e(x, y)$ определяет время экспозиции РИ отклоняющим устройством в точке $(x_e(t), y_e(t))$: $\Delta t \propto S_e(x, y)$. Это означает, что для выбранной траектории движения Γ_e проекции начала координат входной

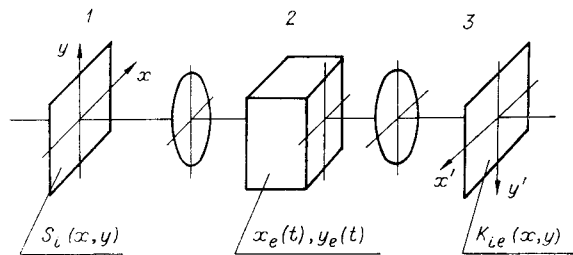


Рис. 1. Блок-схема коррелятора

ной плоскости на плоскость накопителя (рис. 2), достаточно плотно проходящей по всей площади A_e , где интенсивность ЭИ отлична от нуля, скорость движения $V = \sqrt{\dot{x}_e^2(t) + \dot{y}_e^2(t)}$ должна быть обратно пропорциональна