

Б.Д. Борисов, В.М. Клишкин, В.А. Крутиков, А.А. Макаров, Г.В. Федотова, В.А. Чикуров

ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНАЯ СТРОБИРУЕМАЯ ТЕЛЕВИЗИОННАЯ СИСТЕМА РЕГИСТРАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Рассмотрена система регистрации на основе микроканального усилителя яркости, супервидикона и запоминающей электронно-лучевой трубки. Экспериментально оценены эффективность счета квантов, интенсивность шумовых отсчетов и частотно-контрастные характеристики. Изложен алгоритм работы, представлено техническое исполнение.

В задачах технического зрения весьма часто встречается необходимость регистрации изображений слабой освещенности. Например, в спектроскопии такие проблемы возникают при исследовании веществ по спектрам комбинационного рассеяния и флуоресценции. Подобные случаи встречаются в физике плазмы, астрономии, медицине, лазерном зондировании атмосферы и океана, при наблюдении объектов через атмосферу и плотные рассеивающие среды.

Аппаратурное исполнение высокочувствительных систем регистрации может быть различным [1, 2]. Наибольшие возможности будет иметь система, в которой решение задачи накопления и обработки сигнала возложено на видеопроцессор. Однако в ряде случаев целесообразно эксплуатировать более простые и сравнительно доступные системы наблюдения. В данной статье представлено техническое исполнение алгоритма работы и некоторые технические характеристики простой системы для регистрации изображений как в токовом, так и в режиме счета фотонов.



Рис. 1. Внешний вид системы регистрации

Система регистрации (рис. 1) была выполнена на основе микроканального усилителя яркости (УЯ), высокочувствительной телевизионной передающей трубки (ТПТ) и запоминающей электронно-лучевой трубки (ЭЛТ). Чувствительность этого устройства по световому потоку достигает предельных значений за счет способности УЯ, сочлененного с ТПТ, регистрировать одноэлектронные события. Временное стробирование регистратора осуществлено с помощью импульсного питания микроканальной пластины (мкп) УЯ. Минимальная экспозиция, определяемая генератором строб-импульсов, равна 100 нс. Запоминающая ЭЛТ способна накапливать изображение сотен ТВ-кадров и считывать суммарный сигнал в телевизионном стандарте.

Испытание и исследование системы регистрации проводилось на установке, структурная схема которой представлена на рис. 2. Инжекционный лазер 1 типа ЛПИ-103, запускаемый кадровыми синхроимпульсами (КСИ), генерировал импульсы излучения на длине волны $\lambda \approx 0,9$ мкм, длительностью $\tau_n \approx 200$ нс, энергией $E_n \approx 5 \cdot 10^{-6}$ Дж с углом расходимости $2\alpha \approx 40^\circ$. Через поворотное зеркало 13 это излучение освещало тест-объект 15 (размером 435×170 мм) в виде миры Фуко с переменной пространственной частотой. Изображение тест-объекта на фотокатод УЯ 2 строилось светосильным объективом 14, просветленным в ближней ИК-области спектра с фокусным расстоянием $F \approx 148$ мм и диаметром $D_{об} \approx 100$ мм. С целью уменьшения помех, создаваемых видимой частью излучения окружающего фона, перед объективом устанавливался полосовой инфракрасный фильтр 16 типа ИКС-1. Используемый в установке микроканальный УЯ имел электронно-оптическое увеличение $0,9 \div 1,1$, разрешающую способность для центра поля зрения в статическом режиме $\approx 22,6$ штр/мм, многослойный катод с рабочим диаметром $D_{фк} \approx 17$ мм. В течение времени существования переотраженного тест-объектом лазерного сигнала на МКП УЯ, находившуюся под постоянным напряжением $U_n \approx 300$ В, подавался импульс напряжения длительностью $\tau'_n \approx 200$ нс, амплитудой $U_n \approx 700$ В, переводящий его в режим регистрации одноэлектронных событий. (Для токового режима работы его амплитуда составляла ≈ 450 В). Это напряжение формировалось генератором строб-импульсов 12, также запускаемым от КСИ. Блок задержки 9 позволял компенсировать временные задержки, связанные с распространением сигнала до тест-объекта и обратно, а также с формированием импульса излучения лазера и выхода микроканального УЯ на номинальный режим работы. Возникающее на экране УЯ изображение переносилось сдвоенными объективами типа «Гелиос-44-2» на фотокатод супервидикона ЛИ-702-3 5. В качестве базовой системы для монтажа супервидикона была использована серийная прикладная телевизионная установка ПТУ-50 4.

Сигнал с выхода установки подавался на мишень запоминающей ЭЛТ, входящей в состав серийно выпускаемого устройства памяти 6 типа УП-4. Это устройство позволяло производить одно- и многокадровую (до 500 ТВ-кадров) запись ТВ-сигналов, их хранение, а также воспроизведение (считывание) с помощью ВКУ 7. Для обработки экспериментальных результатов в состав установки входила система ввода и обработки изображения (СВОИ) [3], позволяющая запоминать в памяти до четырех полукадров изображения в телевизионном стандарте форматом 256×256×6 бит.

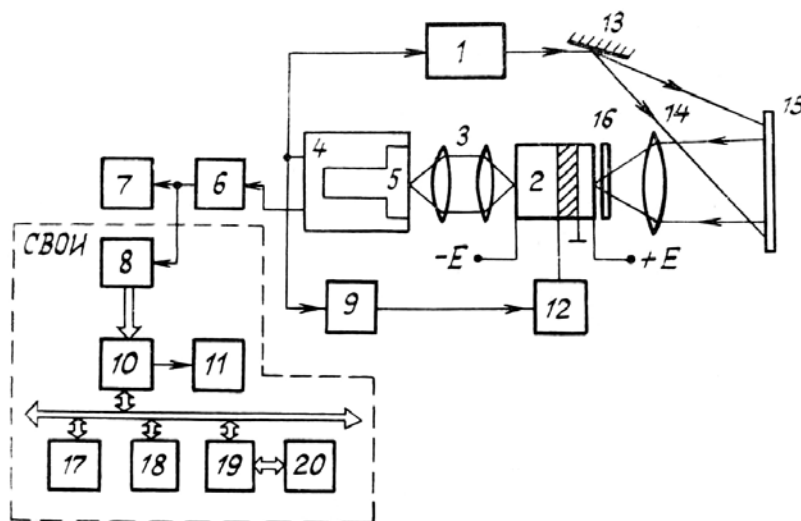


Рис. 2. Структурная схема экспериментальной установки: 1 – инжекционный лазер ЛПИ-103; 2 – микроканальный УЯ; 3 – объективы «Гелиос-44-2»; 4 – ПТУ-50; 5 – ЛИ-702-3; 6 – блок памяти УП-6; 7 – ВКУ1; 8 – АЦП; 9 – блок задержки; 10 – кадровая память; 11 – ВКУ2; 12 – генератор высоковольтных импульсов; 13 – поворотное зеркало; 14 – приемный объектив; 15 – мишень; 16 – светофильтр ИКС-1; 17 – контроллер DL-4; 18 – электронный диск; 19 – контроллер DL-4; 20 – ЭВМ СМ-4

Расчет энергии, приходящей на фотокатод УЯ (в джоулях), создаваемой одним лазерным импульсом, производился по приближенному соотношению:

$$E_{фк} \approx K_6 K_{нкс} K_{об} \frac{E_n}{4\pi} S_n \left(\frac{D_{об}}{2RF \operatorname{tg} \alpha} \right)^2,$$

где $K_{нкс} \approx 0,1$; $K_{об} \approx 0,9$ – коэффициенты пропускания инфракрасного фильтра и объектива соответственно; $K_6 \approx 0,35$ – коэффициент отражения белой полосы тест-объекта; $R = 8210$ мм – расстояние между приемным объективом и тест-объектом; $S_n \approx 0,6$ см² – площадь изображения тест-объекта на фотокатод УЯ, контраст которого принимался равным 100%.

Оцененная таким образом энергия составила величину $E_{\text{фк}} \approx 0,9 \cdot 10^{-15}$ Дж, что соответствует количеству фотонов $N_{\text{фк}} \approx 45 \cdot 10^3$ фот.

Так как экспериментально регистрируемое за экспозицию среднее число одноэлектронных событий $N_{\text{рег}} \approx 45$, то квантовая эффективность системы наблюдения ($\lambda = 900$ нм) не превышала значения $Q = N_{\text{рег}}/N_{\text{фк}} \approx 10^{-3}$.

В максимуме спектральной чувствительности фотокатода УЯ ($\lambda \approx 550$ нм) квантовая эффективность последнего возрастает почти в 50 раз (данные завода-изготовителя) и квантовая эффективность системы наблюдения составляла $Q \approx 5,0 \cdot 10^{-2}$.

Экспериментальная оценка количества шумовых отсчетов, создаваемых шумовыми сцинтилляциями УЯ, интенсивность которых превышает пороговую чувствительность супервидикона ($\approx 2,4 \cdot 10^3$ фот/сцинт [4]), не превышала 7 отсчетов за 10 строб-импульсов или $\approx 1,5 \cdot 10^6$ отсч \cdot см $^{-2} \cdot$ с $^{-1}$, что совпадает с данными [5].

Качество передачи изображения разработанной системы наблюдения оценивалось по максимальному количеству пар линий N_{max} , разрешаемых с заданным контрастом. При этом N_{max} определялось пространственным периодом тест-объекта, а контраст оценивался по известному соотношению

$$K = \frac{U_6 - U_ч}{U_6 + U_ч},$$

где U_6 и $U_ч$ — амплитуды видеосигналов соответственно от центров белой и черной полос, усредненных по их длине. В ходе эксперимента было отмечено, что в зависимости от величины энергии излучения, приходящего на фотокатод УЯ, изменяется как N_{max} , так и паи меньшее число накапливаемых ТВ-кадров $N_{\text{ТВ}}$, необходимых для достижения этого N_{max} (рис. 3). Кроме этого было отмечено, что система наблюдения имеет пороговую энергию $E_{\text{пор}} \approx 10^{-16}$ Дж, так как при меньшем ее значении изображение неформировалось, что в данном случае, по-видимому, связано с преобладанием процессов растекания зарядов на мишени запоминающей ЭЛТ над процессами формирования потенциального рельефа. Экспериментальные результаты, представленные на рис. 4, дают оценку максимального количества пар линий, разрешаемых системой — кривая 1, а также характеризуют зависимость ЧКХ от числа накапливаемых ТВ-кадров — кривые 2, 3, 4.

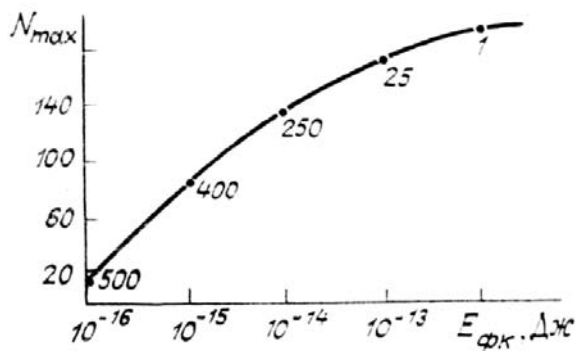


Рис. 3. Зависимость количества пар линий, разрешаемых с контрастом $K \approx 0,1$, от энергии на фотокатоде. Цифрами на графике указано количество накопленных для данной энергии ТВ-кадров

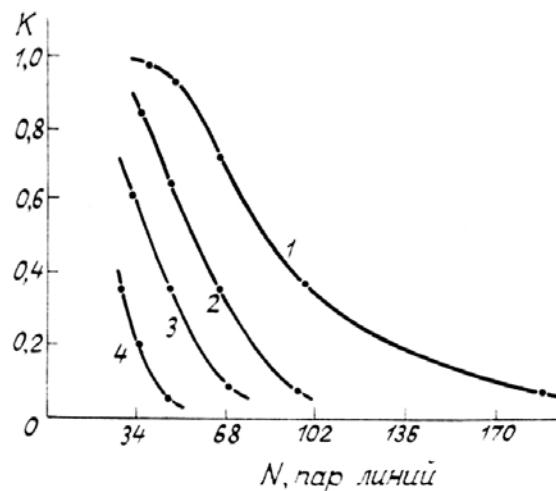


Рис. 4. Частотно-контрастные характеристики системы регистрации. Кривые 2, 3, 4 — для числа накопления ТВ-кадров 500, 400, 100 соответственно, $E_{\text{фк}} \approx 0,9 \cdot 10^{-15}$ Дж. Кривая 1 — токовый режим, $E_{\text{фк}} \approx 2,5 \cdot 10^{-12}$ Дж

Для иллюстрации возможностей системы наблюдения на рис. 5 представлены снимки тест-объекта, наблюдаемого на ВКУ без накопления (верхний снимок) и с накоплением 500 ТВ-кадров (нижний снимок) при энергии на фотокатоде, близкой к пороговой.

В проведенном эксперименте время экспозиции $T_3 \approx 2N_{\text{ТВ}}t'_n$, было значительно меньше времени «регистрации» изображения $T_p \approx 2N_{\text{ТВ}}T_{\text{стр}}$, где $T_{\text{стр}}$ — период повторения строб-импульсов. Так, для $N_{\text{ТВ}} = 500$ соответственно получим $T_3 \approx 2 \cdot 10^{-4}$ с, $T_p \approx 2$ с. Однако если использовать для подсветки тест-объекта лазеры с высокой частотой повторения импульсов генерации (≈ 10 кГц), например на парах металлов, то время регистрации можно уменьшить до $\approx 5 \cdot 10^{-2}$ с. Это, очевидно, приведет к увеличению экспрессности измерений, а также улучшению качества изображения и уменьшению $E_{\text{пор}}$ за счет уменьшения растекания заряда на мишени ЭЛТ, в качестве которой можно использовать мишень супервидикона. Необходимо отметить, что требуемый в этом случае импульсный режим питания

МКП с частотой повторения строб-импульсов $F_{\text{стр}} \leq 10$ кГц не ухудшает одноэлектронных характеристик УЯ [6]. По-видимому, это связано с малой вероятностью срабатывания одного и того же канала МКП за каждый строб-импульс.

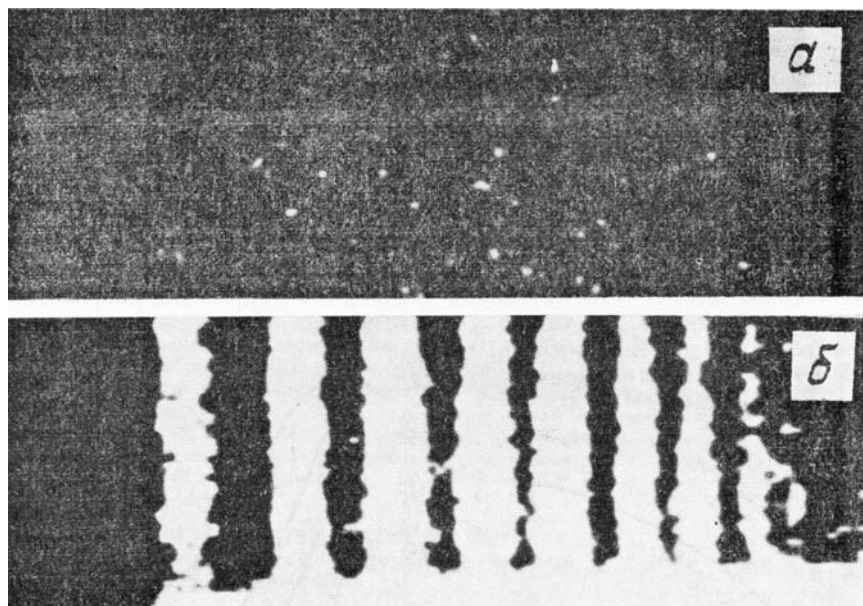


Рис. 5. Изображение регистрируемого тест-объекта: *а* — накопление отсутствует; *б* — накопление 500 ТВ-кадров

Проведенные экспериментальные оценки системы позволяют отметить следующие ее особенности:

1. Качество передачи изображения существенно зависит от энергии на фотокатоде УЯ и числа накапливаемых ТВ-кадров. Это дает возможность при малой энергии подсветки исследуемого объекта или при необходимости временной отсечки оптических фонов существенно улучшить качество регистрируемого изображения методом накопления ТВ-кадров и согласования частоты следования и длительности импульсов подсветки с соответствующими характеристиками генератора строб-импульсов. С учетом всех этих обстоятельств и динамики исследуемого изображения возможен выбор оптимального, относительно качества и количества кадров, изображения (или времени регистрации) режима работы системы.

2. Чувствительность системы наблюдения, а также время экспозиции определяются пороговой энергией формирования потенциального рельефа на мишени запоминающей ЭЛТ.

1. Weistrop D., Williams J.T., Faney R.P. //Adv. in Electronics and Electron.. Phys. 1985. V. 64A. P. 133–140.
2. Горячева Г.С., Грудзинский М.А. и др. //Письма в ЖТФ. Т. 13. Вып. 15. С. 953–957.
3. Гондаренко А.Е., Карпов С.М., Путинцев В.Л. и др. //Аппаратура дистанционного зондирования параметров атмосферы. Томск: ТФ СО АН СССР, 1987. С. 138–142.
4. Макаров А.А., Чикуров В.А. //Оптика атмосферы. Т. 2. № 9. 1989. С. 997–999.
5. Ганичев В.А., Елкин С.К., Зайдель И.Н., Силькис Э.Г. и др. //ПТЭ. № 5. 1987. С. 152–155.
6. Замятин Н.В., Климкин В.М., Чикуров В.А. //Оптика атмосферы. Т. 1. № 3. 1988. С. 104–108.

Институт оптики атмосферы СО АН СССР,
Томск

Поступила в редакцию
12 июня 1990 г.

V.D. Borisov, V.M. Klimkin, V.A. Krutikov, A.A. Makarov,
G.V. Fedotova, V.A. Chikurov. **Highly Sensitive Gated TV-System for Image Recording.**

A recording system is considered in the paper, which is based on the use of a microchannel intensifier, supervidicon and storage CRT. Experimental estimations of the photons detection efficiency, noise level and frequency – contrast characteristics are given. The algorithm of operation and performance characteristics of the system are described.