

УДК 21.373.626

Времяпозиционно-чувствительный детектор излучения

У. Юсупалиев, А. Н. Стрелетов, С. А. Шутеев, П. У. Юсупалиев

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, физический факультет, Россия

Рассмотрена практическая реализация метода существенного снижения уровня (естественного и искусственного) фона в системах получения изображения. Показано, что реализация этого метода тесно связана с методом одновременного измерения двух (угловых) координат фотона и момента его регистрации.

Основная задача систем получения изображений (видеосистем, электронно-оптических преобразователей и др.) — выделение полезной информации на фоне естественного и искусственного шумов. Задача решается путем накопления полезного сигнала и уменьшения уровня шума [1—15] (под шумом понимается фоновая помеха).

Эффективность метода накопления полезного сигнала высока только при слабом сигнале и низком уровне шума [1, 3, 6, 11]. Для повышения эффективности систем получения изображений (СПИ) необходимо снижение уровня шума в процессе регистрации изображения. Такая задача с практической точки зрения особенно актуальна для СПИ в мутных средах (тумане, под водой) [7—9]. Снижение уровня фона существующими СПИ осуществляется путем спектральной, поляризационной и пространственной фильтрации излучения [1, 3—6, 10—12]. Под излучением от исследуемых объектов подразумевается излучение, испускаемое или рассеянное

исследуемыми объектами. Для реализации пространственной фильтрации излучения используются различные растры анализатора изображения, мозаичные приемники, диафрагмы различного назначения и другие устройства. Спектральная и пространственная фильтрации излучения становятся малоэффективными при яркости объекта, близкой к яркости фона [1, 2, 6, 10—12]. Помимо фильтрации излучения для уменьшения шума на аппаратном уровне применяется еще так называемый компенсационный способ, суть которого состоит в отделении полезного сигнала от фонового шума из общего сигнала. Недостатком компенсационного метода является снижение чувствительности системы в целом [10, 11].

Кроме указанных методов снижения уровня фона используется также метод стробирования по времени электронно-оптических преобразователей (ЭОП) при активной подсветке [6, 10, 13, 15]. Суть метода состоит в регистрации полезного сигнала, отраженного от исследуемого объекта, в момент его прихода за время стробирования ЭОП. При этом методе отсекаются оптические искусственные и естественные шумы, входящие от объектов, расположенных перед и за исследуемым объектом. Минимальная длительность,

достигнутая при стробировании ЭОП, составляет примерно 100 нс [10, 13, 15], однако возрастающий при этом уровень собственных шумов системы значительно снижает общую эффективность данного метода стробирования. Дальнейшее уменьшение длительности стробирования столкнулось с трудностями, которые до сих пор не преодолены [6].

Опыт эксплуатации систем получения изображений показывает, что существующие методы снижения уровня фона недостаточно эффективны при отношении сигнал/шум порядка единицы. В связи с этим в работе [16] предложен новый метод существенного снижения уровня фона, практическая реализация которого является целью данной работы.

Основы реализации метода существенного снижения уровня фона

Анализ работы [16] показал, что уровень фона в СПИ можно существенно снизить путем уменьшения длительности ее "кадров" τ_K . Это связано с количеством регистрируемых СПИ фоновых фотонов N_F . Действительно, за время τ_K на вход объектива СПИ попадают фоновые фотоны из поля зрения системы (шаровой сектор с вершиной в центре оптического блока системы и радиусом $Z_K = \tau_K c$ (где c — скорость света в среде). Без учета ослабления света приземной атмосферой при изотропном распределении фоновых фотонов их количество N_F за время τ_K определится следующей формулой [16]:

$$N_F = n_F(\lambda) \Delta \lambda \frac{1}{3} \Omega (\tau_K c)^3 \times \left[\left(1 - \frac{Z_0^3}{Z_K^3}\right) - \sum_i^n \frac{\Omega_i}{\Omega} \left(1 - \frac{Z_i^3}{Z_K^3}\right) \right] + n_0 \frac{1}{3} \Omega Z_0^3 \left[1 - \sum_j^m \frac{\Omega_j}{\Omega} \left(1 - \frac{Z_j^3}{Z_0^3}\right) \right], \quad (1)$$

где Ω — телесный угол поля зрения системы;
 $n_F(\lambda)$ — спектральная плотность фоновых фото-

нов, которая в пределах полосы пропускания интерференционного фильтра считается постоянной;

$\Delta\lambda$ — полоса пропускания интерференционного фильтра;

Ω_i и Ω_j — телесные углы, под которыми видны i -й и j -й посторонние объекты с координатами Z_i и Z_j , соответственно;

Z_0 — расстояния от СПИ до исследуемого объекта.

Суммирование по i и j в выражении (1) проводится по неперекрывающимся телесным углам Ω_i и Ω_j . Величины Z_K, Z_0, Z_i, Z_j должны удовлетворять неравенствам $Z_0 < Z_i < Z_K, 0 < Z_j < Z_0$. В формуле (1) значение N_F записано в виде двух сумм, которые соответствуют количеству фоновых фотонов из областей поля зрения системы за и перед рассматриваемым объектом с координатой Z_0 . Из формулы (1) следует, что количество фоновых фотонов N_F , регистрируемое СПИ, пропорционально кубу длительности "кадра" τ_K , тогда как зависимость N_F от величин Ω и $\Delta\lambda$ пропорциональна первой степени. Для получения изображения объекта с линейным размером $\Delta Z = 3$ см, находящегося на расстоянии Z_0 , по глубине обозрения требуется время $t_{\Delta Z} = \Delta Z/c = 10^{-10}$ с = 100 пс для прохождения излучением расстояния ΔZ . Отсюда ясно, что видеосистема и ЭОП в течение длительности их "кадра" при получении изображения объекта с размером $\Delta Z = 3$ см, помимо фоновых фотонов в рассматриваемом объеме $\Delta V_{\Delta Z}$ поля зрения, накапливают огромное количество фоновых фотонов из других областей поля зрения. Исходя из выражения (1) можно определить отношение числа таких фотонов к числу фоновых фотонов в объеме $\Delta V_{\Delta Z}$ без учета фоновых фотонов от посторонних предметов [16]

$$\frac{(1/3)\Omega Z_K^3 - \Delta V_{\Delta Z}}{\Delta V_{\Delta Z}} = (Z_K^2 / Z_0^2) (\tau_K / t_{\Delta Z}) \times \frac{1}{\left[3 + 3(\Delta Z / Z_0) + (\Delta Z^2 / Z_0^2)\right]} - 1, \quad (2)$$

где $(Z_K / Z_0) > 1, (\Delta Z / Z_0) \ll 1$.

Из формулы (2) видно, что при получении изображения исследуемого объекта с размером $\Delta Z = 3$ см, расположенного на расстоянии $Z_0 = 100$ м, видеосистемы с длительностью $\tau_K = 4 \cdot 10^{-2}$ с накапливают в 10^{18} раз большее количество фоновых фотонов по сравнению с неизбежным фоном из объема $\Delta V_{\Delta Z}$. Для ЭОП с длительностью стробирования $10^{-6} - 10^{-7}$ с соответствующее отношение равно $\sim 10^3 - 10^4$. Отсюда ясно, что уменьшение длительности "кадра" является одним из эффективных методов снижения уровня фона в СПИ по сравнению с существующими методами снижения фона за счет уменьшения величин Ω и $\Delta\lambda$.

Стремление уменьшить длительность "кадра" СПИ, работающей в однофотонном режиме, в пределе должно приближаться к регистрации момента поступления

отдельного фотона. Другими словами, у такой СПИ должно появляться совершенно новое свойство: возможность одновременного измерения двух координат фотона (плоское изображение) и момента его поступления.

Анализ показал, что такое измерение можно провести с помощью фотоприемного устройства (ФПУ) с кодированным коллектором, работающего в однофотонном режиме. С технологической точки зрения среди таких ФПУ наиболее простым является ФПУ с квадратным коллектором [17], предназначенное для измерения двух координат фотона. Последующие исследования показали [18—20], что такое ФПУ имеет следующие недостатки: низкие позиционная разрешающая способность и предельная скорость счета импульсов, повышенные требования к характеристикам компонентов детектора (блока усиления, анода и цифровых измерительных блоков и др.). Среди них основным недостатком является низкая позиционная разрешающая способность, устранение которой влечет за собой устранение других недостатков.

Для выяснения причины этого недостатка рассмотрим процедуру определения координат фотона. В ФПУ рассматриваемого типа падающее на фотокатод вакуумной трубки излучение вследствие фотоэффекта образует фотоэлектроны, которые затем с помощью электрического поля между фотокатодом и микроканальной пластиной (МКП) транспортируются на вход МКП для увеличения количества исходных фотоэлектронов. На выходе МКП создается электронная лавина, диаметр которой с помощью электрического поля увеличивается для того, чтобы электроны лавины попали по крайней мере на три отдельные электрически изолированные секции квадрантного анода. С каждого квадранта анода снимается заряд Q_i (i — номер квадранта коллектора). Согласно работе [17] координаты x и y центра электронной лавины можно определить по следующей простейшей формуле [17]:

$$x = \frac{Q_1 + Q_2 - Q_3 - Q_4}{Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4}; \quad y = \frac{Q_1 + Q_3 - Q_4 - Q_2}{Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4}, \quad (3)$$

где Q_i — заряды, снимаемые с i -го квадранта коллектора.

Из выражений (3) видно, что точность измерения угловых координат фотона зависит от точности измерения зарядов Q_i квадрантного коллектора. На рис. 1 схематически представлены электронная лавина 1 и квадрантный коллектор (анод) 2 для случая, когда часть электронной лавины попадает за пределы квадрантов анода. Эта часть заряда лавины не будет зарегистрирована квадрантным коллектором ФПУ и теряется безвозвратно. Следовательно, теряется также часть суммарного заряда, что приводит к тому, что координаты фотона, определенные по формуле (3), не будут соответствовать истинным координатам фотона. Из этого следует, что периферийные части полученного изображения исследуемого объекта будут сильно искажены.

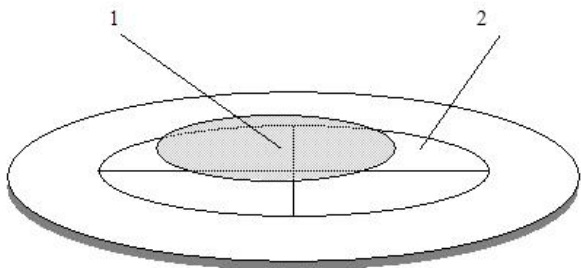


Рис. 1. Схематическое представление электронной лавины на квадрантном коллекторе

Действительно, на рис. 2 показано изображение равномерно распределенных в квадрате излучающих точек, координаты которых рассчитаны по формуле (3). Из рис. 2 видно, что только центральная часть изображения имеет приемлемое качество.

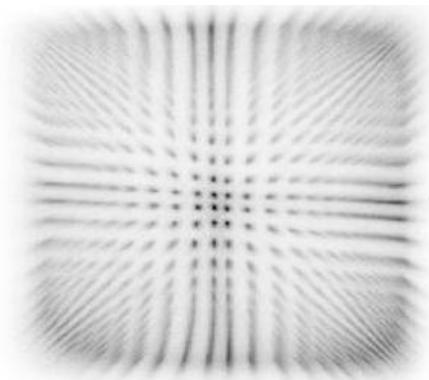


Рис. 2. Изображение тестового объекта, координаты точек которого рассчитаны по формуле (3) при потере части полного заряда электронной лавины

Итак, причиной низкой позиционной разрешающей способности ФПУ с квадрантным коллектором являются потери зарядов. Рассмотрим ниже один из способов устранения этого недостатка.

Времяпозиционно-чувствительный детектор излучения

Для решения поставленной задачи был разработан времяпозиционно-чувствительный детектор (ВПЧД) излучения [19, 20]. Структурная схема ВПЧД представлена на рис. 3. Детектор состоит из блока предварительной обработки излучения 2, позиционно-чувствительного детектора излучения, координатного канала, канала измерения времени, канала измерения полного заряда и системы управления ВПЧД.

Координатный канал предназначен для определения двух координат фотона на основе измерения зарядов, снимаемых с кодированного коллектора позиционно-чувствительного детектора излучения. Он состоит из многоканального усилителя 15, блока измерения зарядов 16, блока определения координат 17, блока коррекции координат 18, времякоординатного блока 19, блока хранения, обработки и визуализации сигнала 20.

В канале измерения полного заряда проводится измерение полного заряда электронной лавины 11, необходимость измерения которого следует из формулы (3). В состав этого канала входят микроканальная пластина 10, блок измерения зарядов 16, блок определения координат 17,

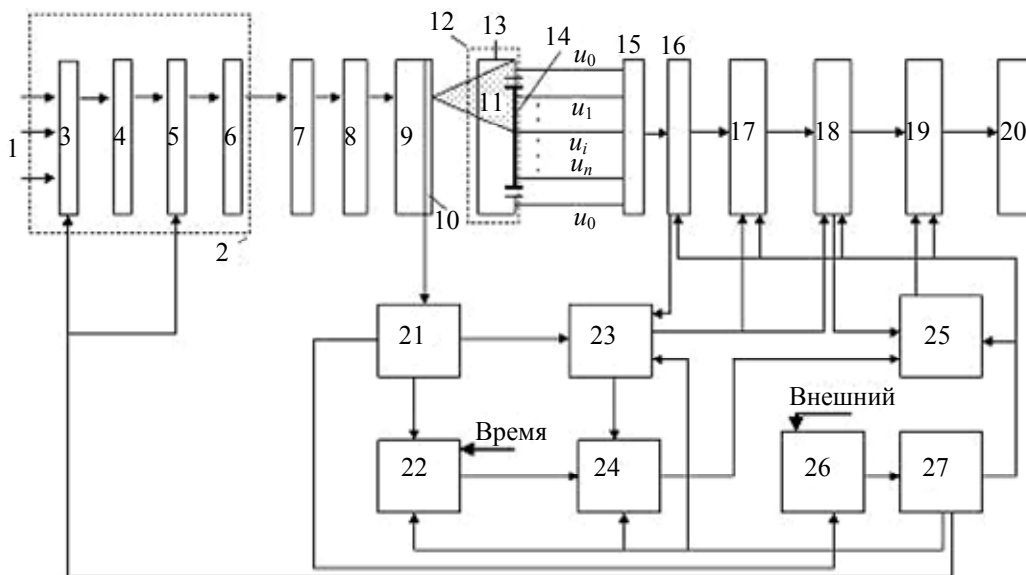


Рис. 3. Структурная блок-схема времяпозиционно-чувствительного детектора излучения

Блок предварительной обработки излучения включает в себя, в зависимости от решаемой задачи, электронно-управляемый ослабитель 3, блок преобразования излучения 4, перестраиваемый оптический фильтр 5 и оптическую систему 6.

Позиционно-чувствительный детектор излучения преобразует оптический сигнал (квант излучения) в электрический сигнал без искажения угловых координат исходного фотона, поэтому он называется позиционно-чувствительным. Такой детектор выполнен в виде вакуумной трубки, внутри которой находятся

фотокатод 7, электронная линза 8, позиционно-чувствительные усилители на основе микроканальных пластин 10 и анодный блок 12, состоящий из дополнительного 13 и основного 14 анодов.

Основной анод выполнен в виде квадрантного электрода, а дополнительный введен для устранения основного недостатка ФПУ с квадрантным коллектором [17] и предназначен для сбора потерянной части заряда электронной лавины в основном аноде. широкополосный усилитель 21 и блок измерения полного заряда 23.

Основная цель канала измерения времени состоит в измерении момента поступления фотона с высокой точностью при высокой скорости счета импульсов. В состав его входят МКП 10, широкополосный усилитель 21, блоки измерения времени 22 и амплитудно-временной коррекции 24.

Система управления предназначена для управления всей работой ВПЧД и состоит из блока анализа 26 и блока принятия решения 27.

Принцип работы ВПЧД

Времяпозиционно-чувствительный детектор работает следующим образом. Поток входного излучения 1 ослабляется до приемлемого для нормальной работы детектора уровня с помощью электронно-управляемого ослабителя 3. Оптический фильтр 5 пропускает требуемый узкий спектральный диапазон излучения, а оптическая система 6 формирует его изображение на поверхности фотокатода 7. Если на вход ВПЧД падает коротковолновое излучение (рентгеновское, γ -излучение), то предусмотрено его преобразование в излучение оптического диапазона с помощью конвертора 4.

Фотокатод преобразует оптический сигнал в электрический, и электронная линза 8 формирует на входной поверхности позиционно-чувствительных усилителей (ПЧУ) 9, выполненных в виде МКП 10, электронное изображение входного потока квантов. Усиленный МКП электрический сигнал представляет собой электронную лавину 11, диаметр которой увеличивается до требуемой величины с помощью электрического поля между МКП и анодным блоком 12.

Далее обработка электрических сигналов проводится по трем каналам: координатному, каналу измерения времени и каналу измерения полного заряда.

Координатный канал

Электрические сигналы с дополнительного U_0 и с основного U_1, \dots, U_4 анодов (для квадрантного анода), вызванные попаданием зарядов электронной лавины на анод, подаются на входы многоканального усилителя 15 для последующего преобразования измерений зарядов в цифровые данные (блок 16). Цифровые сигналы одновременно используются для определения координат центра электронной лавины на основном аноде и измерения полного заряда (блоки 17 и 23). Цифровые

данные о координатах подаются на блок коррекции координат 18.

На другой вход блока определения координат 17 поступает цифровой сигнал с выхода блока 23. Цифровой сигнал с выхода блока измерения полного заряда 23 поступает на входы блоков определения координат 17 и коррекции координат 18. После коррекции цифровые данные о координатах одновременно поступают на входы блока коррекции времени 25 и времякоординатного блока 19. На другой вход времякоординатного блока 19 поступает цифровой сигнал от блока коррекции времени 25. Далее цифровые данные о координатах и времени поступления квантов подаются в блок хранения, обработки и визуализации 20.

Канал измерения времени

Аналоговый электрический сигнал со входа МКП блока ПЧУ подается на вход широкополосного усилителя 21, а после усиления — на входы блоков измерения полного заряда 23 и измерения времени 22. В блоке измерения полного заряда 23 аналоговый электрический сигнал преобразуется в цифровой. На основании сигналов, поступивших из блоков измерения зарядов 16 и усилителя 21, проводится вычисление полного заряда. Выработанный сигнал с выхода блока измерения полного заряда 23 подается на входы блоков определения координат 17, коррекции координат 18 и амплитудно-временной коррекции 24.

В блок определения времени 22 поступают сигнал "Время" и сигнал от усилителя 21. В результате работы блока 22 вырабатывается цифровой сигнал, соответствующий временному интервалу между сигналами. Блок 22 может быть реализован в виде времяамплитудного преобразователя и аналого-цифрового преобразователя. В нем измерение времени происходит по следующей схеме: преобразование временного интервала между сигналами в амплитуду аналогового импульса и последующее преобразование амплитуды этого импульса в цифровой сигнал. Блок 22 представляет собой быстродействующие АЦП, позволяющие конвертировать входные аналоговые сигналы в массив цифр, величина которых соответствует амплитуде входных сигналов через малые равные интервалы времени. Регистрация времени основывается в этом случае на определении по оси времени "центра тяжести" сигналов.

Времяпозиционно-чувствительный детектор управляется блоками анализа 26 и принятия решения 27. Блок анализа 26 запускается либо от внешнего, либо от внутреннего импульса. На его вход поступают аналоговые сигналы от широкополосного усилителя 21, после чего им производится анализ характеристик входных импульсов по заданному алгоритму, и результаты анализа в виде цифрового сигнала подаются на вход блока принятия решения 27. На основе проведенного анализа блоком принимается решение о выработке сигнала управления блоком предварительной обработки излучения, в частности, электронно-управляемым ослабителем 3 и оптическим фильтром (электронно-

перестраиваемым) 5. После достижения заданных характеристик входных импульсов для нормальной работы детектора указанным блоком вырабатываются синхронимпульсы, которые подаются на входы блоков 2, 16—19, 22—25 детектора для начала их работы.

Экспериментальные результаты

Проведенные опыты показали, что учет полного заряда с помощью дополнительного анода существенно улучшает пространственное разрешение ВПЧД, особенно по краям его поля зрения, и, следовательно, увеличивает его поле зрения. Для этого проводилось сравнение изображения тестового объекта при отключенном и включенном дополнительном аноде 13. Такое сравнение показало, что при включенном дополнительном аноде у ВПЧД эффективная поверхность рабочего поля зрения увеличивается приблизительно в четыре раза.

Для получения изображения с максимально возможным качеством требуются алгоритмы, учитывающие заряд, снимаемый с дополнительного анода. Кроме того, наиболее удачным решением восстановления координат оказалось использование калибровки ВПЧД с помощью тестового объекта. Таковым является приведенный выше набор равномерно распределенных в квадрате излучающих точечных объектов (светодиодов). Зная координаты каждого светодиода такой маски, вычисляли матрицу соответствия координат x_i и y_i и зарядов Q_j ($j = 1—5$). Разбив пространство зарядов на подпространство с одинаковыми суммами зарядов, вычисляли коэффициенты интерполяционного многочлена, построенного на множестве известных координат и соответствующих им зарядов. Использование интерполяционного многочлена позволило получить качественное изображение тестового изображения (рис. 4).

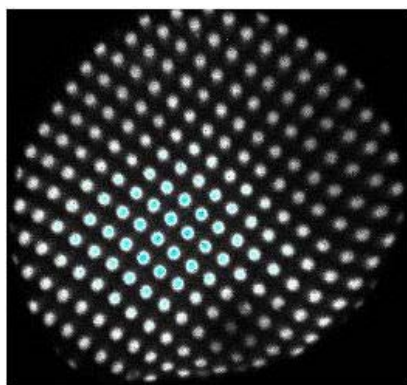


Рис. 4. Изображение тестового объекта, полученное с учетом полного заряда электронной лавины с использованием корректного алгоритма

Опыт показал, что искажение полученного изображения происходит вследствие неоднородности характеристик МКП, в частности неравномерности коэффициента усиления по площади. Для устранения указанного искажения изображения был применен ме-

тод коррекции координат, который аппаратно осуществляется в блоке коррекции координат 18 на основании предварительной калибровки его с помощью тестового объекта.

Для улучшения точности измерения времени применена процедура амплитудно-временной коррекции, которая осуществляется в цифровом блоке амплитудно-временной коррекции. Для этого сначала находится калибровочная кривая зависимости времени от величины заряда, затем данные указанной калибровочной зависимости вводятся в память блока амплитудно-временной коррекции.

Опыт показал, что точность измерения времени поступления фотона при скорости счета импульсов 10^5 имп/с составляет $\sim 90—110$ пс.

Снижение требований к техническим характеристикам компонентов детектора излучения достигалось применением амплитудно-временной коррекции, а также коррекции времени и координат.

Заключение

Введение дополнительных блоков и изменение конструкции анода позволили, не повышая требований к техническим характеристикам составных частей детектора, расширить его функциональные возможности и улучшить выходные характеристики: точность определения времени и координат кванта излучения, что в свою очередь улучшает качество детектируемого изображения. Экспериментально доказана возможность одновременного измерения двух координат и момента поступления отдельных фотонов, рассеянных или излученных рассматриваемым объектом.

Л и т е р а т у р а

1. Якушенков Ю. Г., Луканцев В. Н., Колосов М. П. Методы борьбы с помехами в оптико-электронных приборах. — М.: Радио и связь, 1981.
2. Якушенков Ю. Г. Основы теории и расчета оптико-электронных приборов. — М.: Машиностроение, 1989.
3. Копейка Н. С., Бордовья Дж. // ТИИЭР. 1980. V. 58. № 10. С. 170.
4. Сигналы и помехи в лазерной локации/ Под ред. В. Е. Зуева. — М.: Радио и связь, 1986.
5. Хинрикус Х. В. Шумы в лазерных информационных системах. — М.: Радио и связь, 1987.
6. Optical Pattern Recognition XI// Proc. SPIE. 2000. V. 4043. Orlando, Florida, 26—27 April.
7. Заге Э.П., Иванов А. П., Кацев И. Л. Перенос изображения в рассеивающей среде. — Минск: Наука и техника, 1985.
8. Левин И. М. Справочник по подводному видению. — Л., 1991.
9. Зеленский В. В., Мартынов В. Л., Колобков В. С. и др. // Сб. матер. юбилейной науч.-практич. конф. 15 ЦНИЛ ВМФ МО. — Санкт-Петербург, 2001.
10. Всесоюзная научная конф. "Оптика моря и атмосферы". Ч. 2. — Красноярск, 1990.
11. Агшиев. Защита от фоновой помехи в оптико-электронных системах контроля состояния атмосферы. — М.: Машиностроение, 1994.
12. 7-й Междунар. симпозиум "Оптика атмосферы и океана". — Томск, 16—19.06. 2000.

13. Ошлаков В. Г. // ПТЭ. 1984. № 1. С. 178.
14. Михельсон Е. Н. Оптика астрономических телескопов и методы ее расчета — М.: ФМЛ, 1995.
15. Карасик В. Е. Лазерные системы видения. — М.: МГТУ, 2001.
16. Юсупалиев У., Шутеев С. А. // Прикладная физика. 2003. № 3. С. 96.
17. Lampton R. F. // Rev. Sci. Instrum. 1976. V. 47. № 11. P. 1360.
18. Ainbond M. R. SPIE Proc. 1997. V. 3732.
19. Пат. 2217708 РФ от 27.11. 2003/ Юсупалиев У., Стрепетов А. С., Шутеев С. А.
20. Шутеев С. А. Дис. ... канд. техн. наук. — М.: МГУ. 2005. — 125 с.

Статья поступила в редакцию 18 июля 2006 г.

Time-position-sensitive detector of radiation

U. Yusupaliev, A. N. Strepetov, S. A. Shuteev, P. U. Yusupaliev
Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

A practical realisation of the new method of decreasing a background level in the system of obtaining image is considered. It is shown that the realisation of this method relates of a method of a measure two photon coordinates and moment of it's registration simultaneously.

* * *