

УДК 21.373.626

## МЕТОД ВЫДЕЛЕНИЯ ПРОИЗВОЛЬНОГО СЛОЯ В СИСТЕМЕ ПОЛУЧЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ С ТРЕХМЕРНЫМИ КООРДИНАТАМИ

У. Юсупалиев, С. А. Шутеев<sup>1</sup>, П. У. Юсупалиев<sup>1</sup>

*Рассмотрен метод выделения произвольного слоя из интегрального по дальности изображения в системе получения изображения объектов с трехмерными координатами. Реализация этого метода в условиях данной работы позволила повысить отношение сигнал/шум в 7 – 27 раз.*

В последнее время возникло новое направление в технике и технологии получения изображения объектов – получение трехмерного изображения объектов с реальными координатами в реальном времени [1–6]. Некоторые особенности одной из перспективных систем, работающей в реальном времени, приведены в [3, 6]. Макетный образец такой системы состоит из время-позиционно-чувствительного детектора излучения (ВПЧД) [4, 7], пикосекундного лазера, работающего на длине волны 635 нм, и блока синхронизации. Принцип работы такой системы состоит в получении послойного изображения обозреваемого пространства с высоким разрешением по дальности (по третьей координате  $Z$ ). Такой принцип работы реализован на основе нового метода одновременного измерения угловых координат  $(X, Y)$  и моментов поступления  $t$  так называемых “меченых” фотонов, отраженных от точек поверхности объекта. Экспериментально установленная величина разрешения по дальности  $\delta Z$  составила 3 мм, что соответствует точности измерения моментов поступления “меченых” фотонов  $\delta t \approx 10^{-11}$  с [3, 6].

Для существенного повышения отношения сигнал/шум в такой системе был разработан новый метод выделения произвольного слоя из интегрального по дальности

<sup>1</sup>МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия.

изображения. Целью данного сообщения является исследование некоторых возможностей такого метода.

*Основы метода выделения произвольного слоя из интегрального по дальности изображения.* Требуется получать изображение объекта с пространственными координатами точек его поверхности. При этом особую актуальность приобретает вопрос о величине длительности регистрации оптического сигнала  $\tau_k$ . Рассмотрим этот вопрос более подробно.

При получении изображения объекта любая система получения изображения (СПИ) за время  $\tau_k$ , помимо полезного сигнала  $N_0(\Delta\lambda, \tau_k)$ , регистрирует  $N_N(\Delta\lambda, \tau_k)$  фоновых фотонов из поля зрения системы,  $N_{ob1}(\Delta\lambda, \tau_k)$  и  $N_{ob2}(\Delta\lambda, \tau_k)$  фотонов, рассеянных на атмосферных образованиях и отраженных от поверхностей посторонних предметов, расположенных за и перед рассматриваемым объектом (с координатой  $Z_0$ ):

$$N(\Delta\lambda, \tau_k) = N_0(\Delta\lambda, \tau_k) + N_N(\Delta\lambda, \tau_k) + N_{ob1}(\Delta\lambda, \tau_k) + N_{ob2}(\Delta\lambda, \tau_k), \quad (1)$$

где  $N_0(\Delta\lambda, \tau_k)$  – количество фотонов, отраженных от точек поверхности рассматриваемого объекта с координатой  $Z_0$ ,  $\Delta\lambda$  – полоса пропускания интерференционного фильтра. Объем, из которого собираются фоновые фотоны, представляет собой шаровой сектор с вершиной в центре оптического блока СПИ и радиусом  $Z_K = \tau_k \cdot c$  ( $c$  – скорость света в среде). Поэтому количество фоновых фотонов  $N_N$  за время  $\tau_k$  при предположении, что они распределены в пространстве изотропно, оценивается как:

$$N_N(\Delta\lambda, \tau_k) = \frac{n_n(\lambda)e^{-\mu(\lambda)Z_k}\Delta\lambda\Omega(c\tau_k)^3}{3} \times \left[ 1 - \frac{\Omega_0}{\Omega} e^{-\mu(\lambda)(Z_k - Z_0)} \left( 1 - \frac{Z_0^3}{Z_K^3} \right) - \sum_i^n \frac{\Omega_i}{\Omega} e^{-\mu(Z_k - Z_i)} \left( 1 - \frac{Z_i^3}{Z_K^3} \right) \right], \quad (2)$$

где  $\Omega$  – телесный угол поля зрения входной оптики системы,  $n_N(\lambda)$  – спектральная плотность фоновых фотонов в единице объема,  $\Omega_0$  и  $\Omega_i$  – телесные углы, под которыми видны рассматриваемый объект и  $i$ -ый посторонний объект с координатой  $Z_i$ ,  $\mu(\lambda)$  – коэффициент ослабления излучения атмосферой. Спектральная плотность фоновых фотонов  $n_N(\lambda)$  и коэффициент ослабления  $\mu(\lambda)$  в пределах полосы пропускания интерференционного фильтра будем считать постоянными. Соотношение (2) справедливо для телесных углов  $\Omega_0$  и  $\Omega_i$ , которые между собой не перекрываются.

Из (2) следует, что снижения уровня фона можно добиться за счет уменьшения спектральной плотности фоновых фотонов  $n_N(\lambda)$ , величины телесного угла  $\Omega$  поля зрения,

спектральной полосы пропускания фильтра  $\Delta\lambda$  и длительности регистрации оптического сигнала  $\tau_k$ . Способы снижения уровня фона, помимо уменьшения длительности регистрации  $\tau_k$ , широко используются в существующих СПИ. Рассмотрим влияние величины  $\tau_k$  на уровень фона для СПИ.

Для получения изображения объекта с линейным размером  $\Delta Z = 3$  мм по глубине обозрения требуется длительность регистрации системы  $t_{\Delta Z} = 2\Delta Z/c = 20$  пс. При длительности регистрации, значительно превышающей это значение, такой как, например, у видеосистемы или ЭОП (длительности их “кадра”), при получении изображения объекта с размером  $\Delta Z = 3$  мм кроме фоновых фотонов в рассматриваемом объеме  $\Delta V_{\Delta Z}$  поля зрения с характерным размером  $\Delta Z$  накапливаются фоновые фотоны из других областей поля зрения. Исходя из выражения (2), при  $\frac{\Delta Z}{Z_0} \ll 1$  определим отношение количества таких фотонов к количеству фоновых фотонов в рассматриваемом объеме  $\Delta V_{\Delta Z}$  без учета фотонов от посторонних предметов:

$$\frac{(1/3)\Omega Z_K^3 - \Delta V_{\Delta Z}}{\Delta V_{\Delta Z}} \approx \left(\frac{c\tau_k}{3Z_0}\right)^2 \left(\frac{\tau_k}{t_{\Delta Z}}\right). \quad (3)$$

Из формулы (3) видно, что при получении изображения исследуемого объекта с размером  $\Delta Z = 3$  мм, расположенного на расстоянии  $Z_0 = 100$  м, видеосистема с  $\tau_k = 4 \cdot 10^{-2}$  с накапливает в  $10^{21}$  раз большее количество фоновых фотонов по сравнению с неизбежным фоном (из объема  $\Delta V_{\Delta Z}$ ). Для ЭОП при его длительности стробирования  $\tau_k \approx 10^{-7}$  с соответствующее отношение равно  $\sim 3 \cdot 10^3$ . Таким образом, сокращение длительности регистрации  $\tau_k$  является одним из эффективных методов снижения уровня фона в СПИ, что связано с сильной зависимостью между величинами  $N_N$  и  $\tau_k$ : кубической зависимостью  $N_N \sim \tau_k^3$ . Именно в этом и заключается перспективность способа сокращения длительности регистрации сигнала  $\tau_k$ .

Итак, с помощью любой СПИ можно получить интегральное изображение по дальности  $\Delta Z_K = \tau_k \cdot c$ . Например, для видеосистемы в полосе прозрачности атмосферы величина  $\Delta Z_K$  составляет 12000 км, а для ЭОП при длительности стробирования  $\tau_k \approx 10^{-7}$  с  $\Delta Z_K \sim 30$  м. Соответственно для СПИ с  $\tau_k = 10^{-11} - 10^{-10}$  с значение  $\Delta Z_K$  будет в пределах 3–30 мм. Уменьшение длительности регистрации  $\tau_k$  в пределе приводит к регистрации моментов поступления отдельных фотонов. Другими словами, у такой СПИ должно появиться совершенно новое свойство: возможность одновременного измерения двух координат фотонов (плоское изображение) и момента их поступления. А при наличии импульсной подсветки с короткой длительностью, синхронизированной с

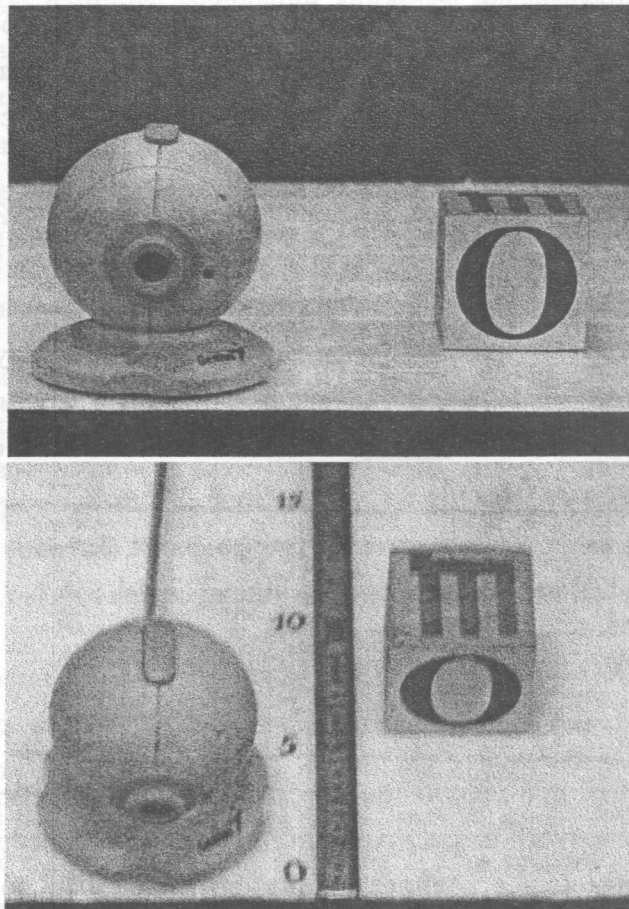


Рис. 1. Тестовые объекты: веб-камера и кубик. Камера имеет диаметр 50 мм, ребро кубика – 40 мм.

такой СПИ, появляется возможность одновременного измерения трех координат точек поверхности исследуемого объекта, от которых отражаются фотоны.

Из (1) и (3) следует, что если из полученного изображения отсечь шумовые фотоны для исследуемого объекта и фотоны от посторонних предметов, то отношение сигнал/шум

$$\frac{N_0(\Delta\lambda, \tau_k)}{N_N(\Delta\lambda, \tau_k) + N_{ob1}(\Delta\lambda, \tau_k) + N_{ob2}(\Delta\lambda, \tau_k)}$$

сводится к выражению  $\frac{N_0(\Delta\lambda, \tau_k)}{\Delta N_N(\Delta\lambda, \tau_k)}$ , где  $N_N(\Delta\lambda, \tau_k) = \Delta N_N(\Delta\lambda, \tau_k) + N_{N1}(\Delta\lambda, \tau_k)$ ,  $N_{N1}(\Delta\lambda, \tau_k)$  – количество фоновых фотонов из поля зрения системы за вычетом выбранного объема  $\Delta V_{\Delta Z}$ ,  $\Delta N_N(\Delta\lambda, \tau_k)$  – количество неизбежных фоновых фотонов из

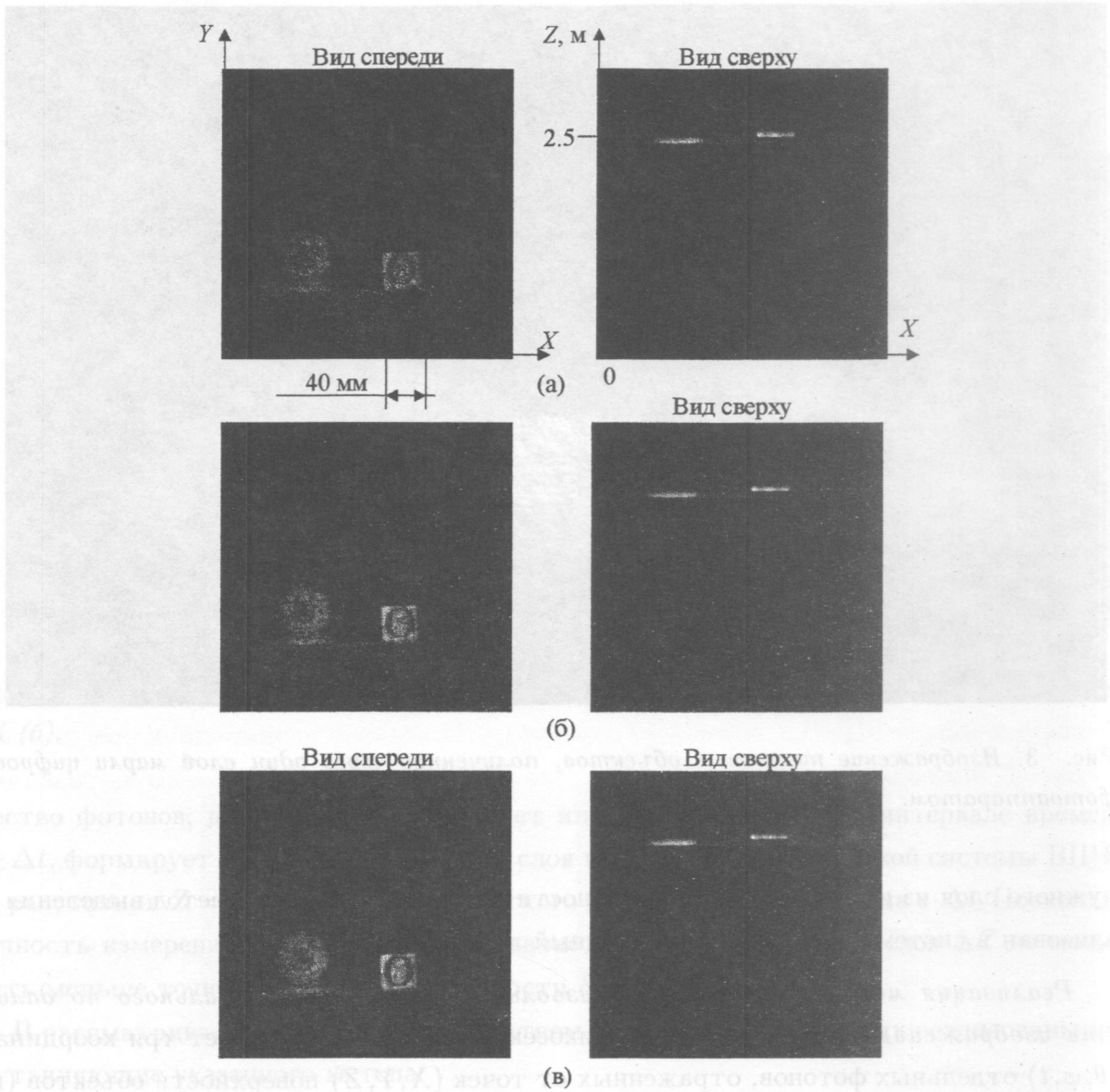


Рис. 2. Изображение тестовых объектов без марли, полученные за различное время методом накопления. Изображение в левой части представляет собой интегральное изображение по дальности (по координате  $Z$ ) в плоскости  $YX$ , а изображение в правой части – изображение в плоскости  $ZX$ . (а) – за 1 с.; (б) – за 5 с.; (в) – за 10 с.

этого объема. Так как  $\Delta N_N(\Delta\lambda, \tau_k) \ll N_N(\Delta\lambda, \tau_k) + N_{об1}(\Delta\lambda, \tau_k) + N_{об2}(\Delta\lambda, \tau_k)$  то величина отношения сигнал/шум существенно повысится. Отсекание шумовых фотонов и фотонов от посторонних предметов в СПИ можно осуществить за счет выделения

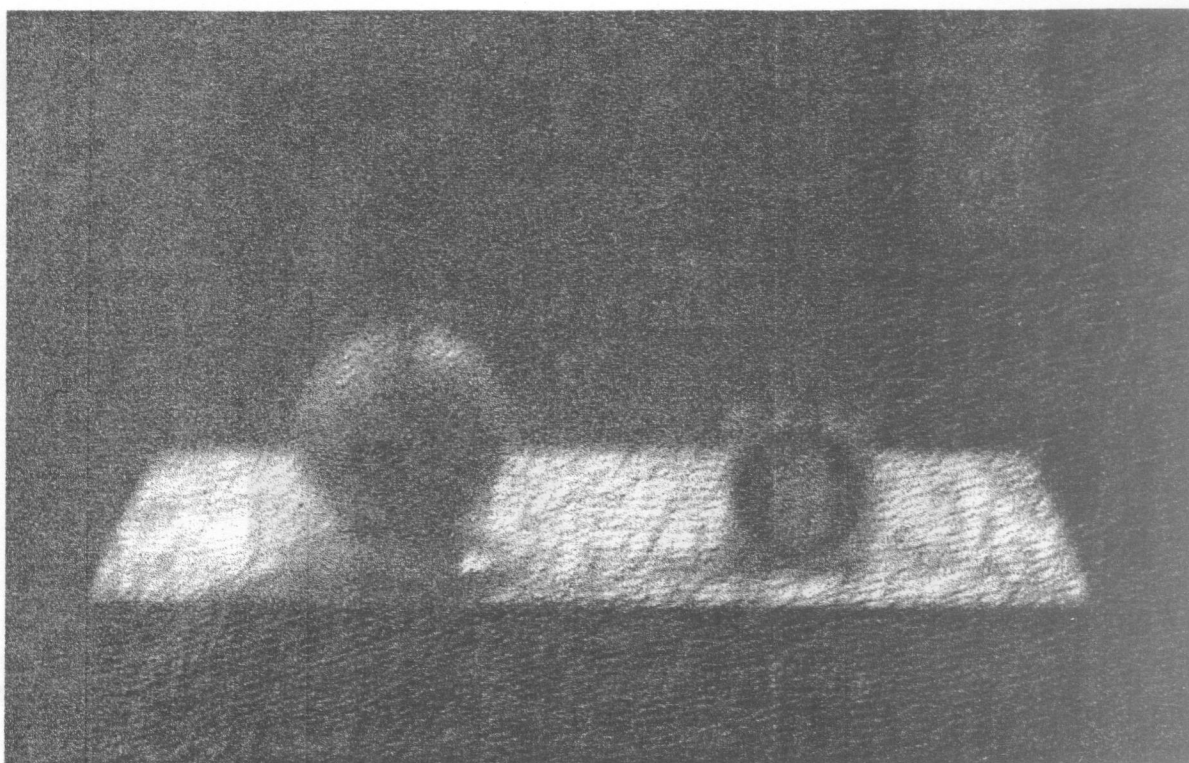


Рис. 3. Изображение тестовых объектов, полученное через один слой марли цифровым фотоаппаратом.

нужного слоя из интегрального по дальности изображения. Такой метод выделения реализован в системе ВПЧД – пикосекундный лазер.

*Реализация метода выделения произвольного слоя из интегрального по дальности изображения.* Система ВПЧД – пикосекундный лазер измеряет три координаты  $(\theta, \varphi, t)$  отдельных фотонов, отраженных от точек  $(X, Y, Z)$  поверхности объектов (или рассеянных неоднородностями среды) в поле зрения оптической системы ВПЧД. Процедура измерения их координат проводится следующим образом. Оптический сигнал, формируемый отраженными от объекта фотонами импульса лазера, преобразуется в электронные сигналы, которые затем оцифровываются. В блоке вычисления координат этой системы с помощью оцифрованных сигналов проводится процедура вычисления координат фотонов по заданному алгоритму (определенным формулам), а цифровые данные их координат накапливаются в массиве данных. Этот массив представляет собой связное множество координат точек  $X, Y$  и времени  $t$  их регистрации от момента посылки последнего импульса лазера:  $\{(X_i, Y_i, t_i), i - \text{порядковый номер фотона}\}$ . Мно-

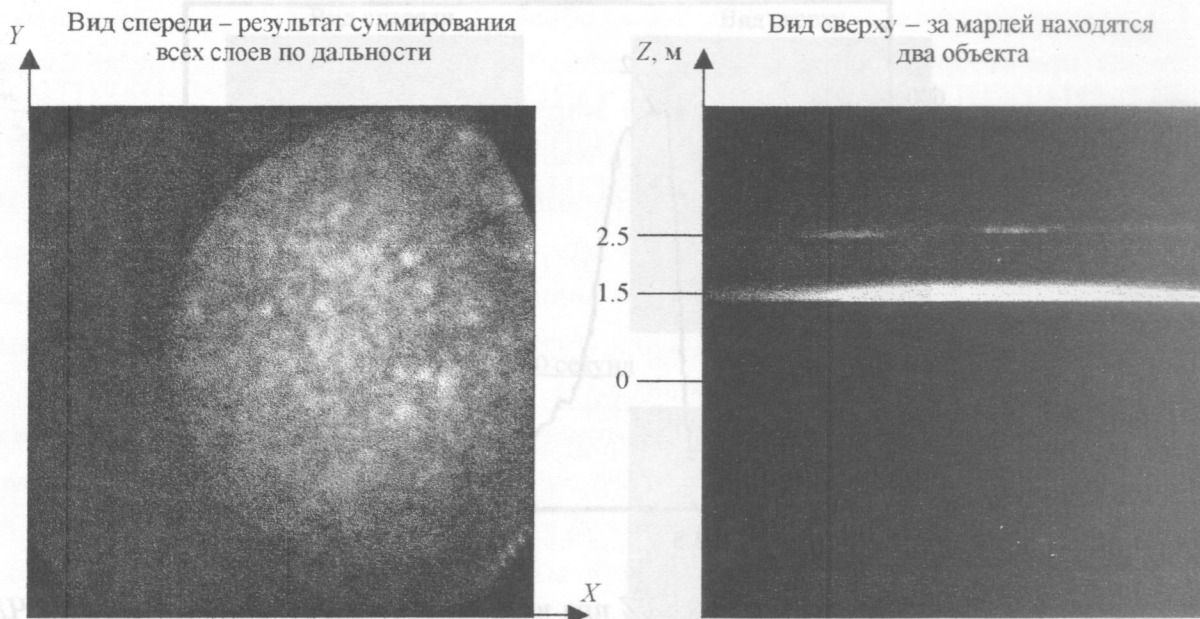


Рис. 4. Изображение объектов за одним слоем марли в плоскости  $YX$  (а) и плоскости  $ZX$  (б).

жество фотонов, для которых  $t$  совпадает или лежит в заданном интервале времени  $t \pm \Delta t$ , формирует изображение плоского слоя в поле зрения оптической системы ВПЧД на расстоянии  $Z = (c \cdot t)/2$ . Толщина плоского слоя  $\Delta Z$  очевидно равна  $c \cdot \Delta t$ . Поскольку точность измерения координаты  $Z$  составляет  $\sim 3$  мм, то толщина слоя  $\Delta Z$  не может быть меньше точности измерения дальности  $\delta Z$ :  $(\Delta Z)_{\text{MIN}} \approx 3$  мм.

В рассматриваемой системе на аппаратном и программном уровнях реализованы две составляющие указанного метода:

выделение произвольного слоя из полученного интегрального по дальности изображения (по координате  $Z$ );

регистрация пространственного распределения фотонов, отраженных от выбранного плоского слоя, находящегося на расстоянии  $Z_0$ .

Первая составляющая метода позволяет определять абсолютные геометрические размеры исследуемого объекта без априорных данных о нем [5], чего нельзя добиться с помощью существующих СПИ.

Для выяснения возможностей второй составляющей предложенного метода проводился эксперимент, в котором использовался сильно рассеивающий экран (марля), по-

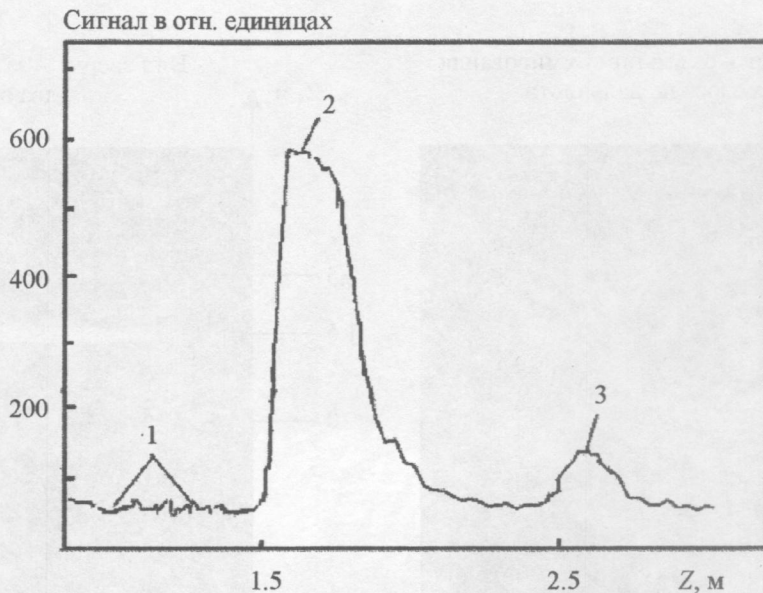


Рис. 5. Распределение сигнала вдоль оси  $OZ$  при наличии одного слоя марли между ВПЧД и тестовым объектом.

мещенный между ВПЧД и тестовыми объектами. Изображение последних представлено на рис. 1. Изображения, полученные системой ВПЧД – лазер без марли за различное время при скорости счета импульсов  $3 \cdot 10^4$  имп/с, показаны на рис. 2. При этом изображение объектов формируется за 0.5–1.0 с. Изображение в левой части рис. 2 является интегральным по дальности (по координате  $Z$ ). Это есть сумма плоских изображений слоев толщиной  $\Delta Z \approx 3$  мм в плоскости  $YX$ . А изображение в правой части рис. 2 представляет собой изображение тестовых объектов, разнесенных по дальности (по координате  $Z$ ) в плоскости  $ZX$ . Видно, что по мере накопления сигнала улучшается качество изображения.

Изображения тестовых объектов, полученные с помощью цифрового фотоаппарата и системы ВПЧД – лазер через один слой марли, приведены на рис. 3 и рис. 4 соответственно. Фотоаппарат помещался на месте ВПЧД. Изображение рис. 4(а) представляет собой интегральное по дальности изображение. Распознать объекты на этих изображениях не представляется возможным. Заметим, что изображения тестовых объектов, полученные через один слой марли видеосистемой и ЭОП в идентичных условиях, практически не отличаются от изображения на рис. 3.

При обработке данных рис. 4(б) получено распределение величины сигналов по дальности (вдоль оси  $OZ$ ), которое представлено на рис. 5. Для тестовых объектов мар-



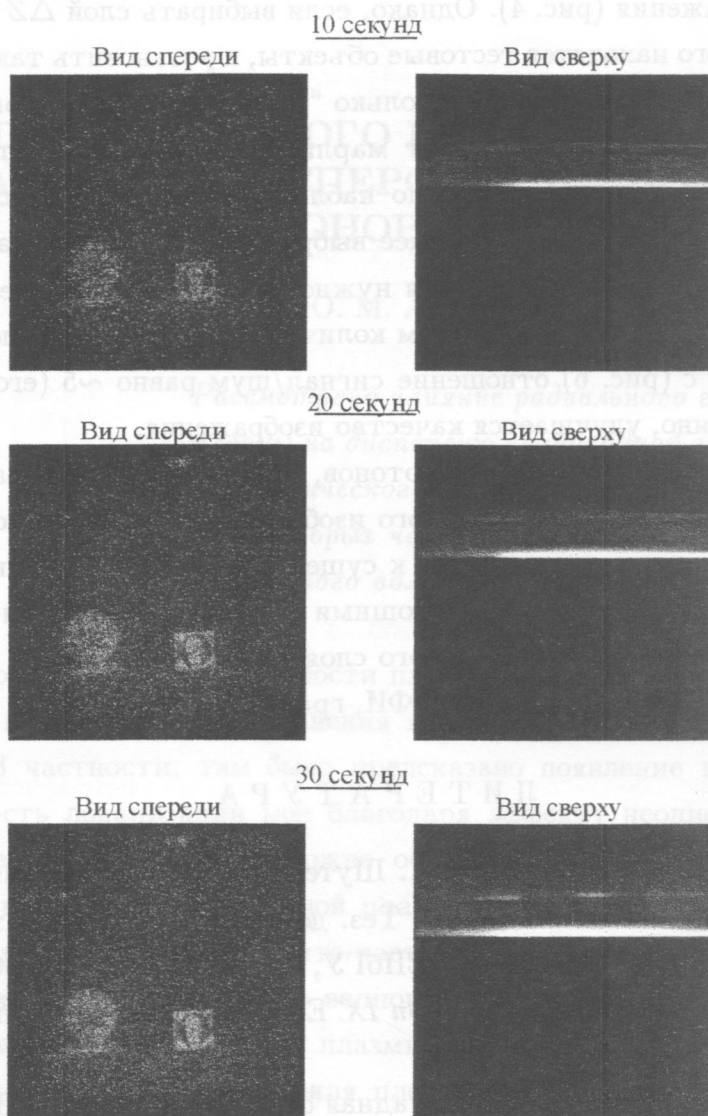


Рис. 6. Изображение тестовых объектов за одним слоем марли, полученные за различное время методом накопления. 1 – сигнал от фона плюс шум прибора; 2 – сигнал от одного слоя марли и фона плюс шум прибора; 3 – сигнал от тестового объекта плюс шум прибора.

ля является посторонним предметом, и величина сигнала от нее соответствует члену  $N_{об1}(\Delta\lambda, \tau_k)$  в (1). В условиях эксперимента посторонний предмет за тестовым объектом отсутствует ( $N_{об2}(\Delta\lambda, \tau_k) = 0$ ). Из рисунка видно, что величина сигнала от марли (фона для тестового объекта) в  $\sim 5.5$  раз больше, чем величина сигнала от тестового объекта, что соответствует величине отношения сигнал/шум 0.18 для интегрального

по дальности изображения (рис. 4). Однако, если выбирать слой  $\Delta Z = Z_2 - Z_1 = 2.57 - 2.4$  м, внутри которого находятся тестовые объекты, и установить такой режим работы системы, при котором регистрируются только “меченые” фотоны, пришедшие из этого выбранного слоя, то фоновый сигнал от марли устраняется. При таком режиме работы системы уже в течение 10 с можно наблюдать изображение объектов (рис. 6). Отношение сигнал/шум, соответствующее выбранному слою  $\Delta Z$ , на момент  $t = 10$  с составляет  $\sim 2$ . То есть метод выделения нужного слоя привел к увеличению отношения сигнал/шум до  $\sim 11$  раз. Со временем количество накопленных полезных сигналов растет и при  $t = 30$  с (рис. 6) отношение сигнал/шум равно  $\sim 5$  (его рост составляет  $\sim 27.7$ ). Соответственно, улучшается качество изображения.

Таким образом, метод регистрации фотонов, отраженных от выбранной области поля зрения системы получения трехмерного изображения, позволяет отсекал фоновые сигналы. Это, в свою очередь, приводит к существенному улучшению отношения сигнал/шум, чего нельзя добиться существующими СПИ. В этом и состоит оригинальность и новизна метода выделения произвольного слоя.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант N 05-08-50343-а.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] У. Юсупалиев, С. Н. Маркова, С. А. Шутеев, *Получение объемных изображений при помощи системы ФПУ – лазер*. Тез. док. конф. “Лазеры. Измерения. Информация”, 2001 г., Санкт-Петербург (СПбГУ, Санкт-Петербург, 2001).
- [2] *Laser Radar Technology and Application IX*. Ed. by Gary W. Kamerman, Proc. of SPIE **5412** (SPIE Bellingham, WA, 2004).
- [3] У. Юсупалиев, С. А. Шутеев, Прикладная физика No. 3, 96 (2003).
- [4] А. С. Стрепетов, С. А. Шутеев, У. Юсупалиев, “Время-позиционный детектор излучения”. Патент РФ N 2217708 от 27.11.2003 г. Приоритет от 05.02.2002 г.
- [5] С. А. Шутеев, В. В. Михеев, А. И. Соколов, П. У. Юсупалиев, Прикладная физика No. 3, 101 (2003).
- [6] С. А. Шутеев, Диссертация на соиск. уч. степ. к.ф.-м.н. (М., МГУ, 2005).
- [7] У. Юсупалиев, А. Н. Стрепетов, С. А. Шутеев, П. У. Юсупалиев, Прикладная физика No. 6, 123 (2006).

Институт общей физики  
им. А.М. Прохорова РАН

Поступила в редакцию 17 апреля 2008 г.