V. 84, N 5

SEPTEMBER — OCTOBER 2017

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАССТОЯНИЙ АКТИВНО-ИМПУЛЬСНЫМИ СИСТЕМАМИ ВИДЕНИЯ С УЧЕТОМ ФОРМЫ ИМПУЛЬСА ПОДСВЕТКИ

В. А. Горобец, Б. Ф. Кунцевич \*, Д. В. Шабров

УДК 621.384.3:621.391

Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси, 220072, Минск, просп. Независимости, 68, Беларусь; e-mail: bkun@ifanbel.bas-net.by

(Поступила 31 марта 2017)

Для активно-импульсных систем видения с импульсами подсветки треугольной и трапециевидной форм получены пространственно-энергетические профили (ПЭП) сигнала при изменении временной задержки между передними фронтами строб-импульса и импульса подсветки. Установлено, что если длительность импульса подсветки  $\Delta t_{\rm лаз}$  меньше или равна длительности строб-импульса  $\Delta t_{ЭОП}$ , то выражения для характерных расстояний те же, что и для импульсов прямоугольной формы, и их можно использовать для определения расстояния до объектов. При  $\Delta t_{\rm лаз} > \Delta t_{ЭОП}$  в случае импульсов подсветки треугольной формы ПЭП приобретает колоколообразный вид. Для импульсов трапециевидной формы ПЭП имеет колоколообразную форму с наличием или отсутствием платообразного участка. Предложен эмпирический метод определения характерных расстояний до максимума ПЭП и граничных точек платообразного участка, которые затем используются для вычисления расстояния до объекта. С использованием калибровочных постоянных предложен метод определения расстояния до объекта и экспериментально подтверждена его работоспособность.

Ключевые слова: активно-импульсная система видения, непрямоугольная форма импульса подсветки, пространственно-энергетический профиль, расстояние до объекта.

For active-pulse vision systems with illuminating pulses of triangular and trapezoidal forms the rangeenergy profiles (REP) of the signal have been obtained with a change in the time delay between the leading front of the strobe pulse and the illuminating pulse. It is established that if the duration of the illuminating pulse  $\Delta t_{las}$  is less than or equal to the duration of the image convertor strobe pulse  $\Delta t_{IC}$ , the expressions for the characteristic distances coincide with the case of pulses of a rectangular shape and they can be used to determine the distance to objects. In the case of triangular-shaped illuminating pulses at  $\Delta t_{las} > \Delta t_{IC}$  the REP acquires a bell-like shape. For pulses of a trapezoidal shape the REP has a bell-shaped shape with or without a plateau-like region. An empirical method for determining the characteristic distances to the maximum of the REP and the boundary points of the plateau-like region which are then used to calculate the distance to the object has been proposed. With the use of calibration constants a method for determining the distance to the object has been proposed, and its operability is experimentally confirmed.

**Keywords:** active pulse system of vision, nonrectangular shape of illuminating pulses, range-energy profile, distance to the object.

Введение. Активно-импульсным системам видения (АИСВ) в настоящее время уделяется большое внимание, направленное на решение с их помощью различных прикладных задач, а также на дальнейшее расширение их потенциальных возможностей (см., например, [1-9]). Действие АИСВ основано на импульсной подсветке объектов лазерным излучением и синхронизированным с ней включением с определенной задержкой  $\Delta t_{зад}$  на короткое время (стробированием) приемной части. В приемной части в качестве затвора и фотоприемника обычно используется электронно-оптический

## DETERMINATION OF DISTANCES BY ACTIVE-PULSE VISION SYSTEMS TAKING INTO ACCOUNT THE ILLUMINATION PULSE SHAPE

**V. A. Gorobets, B. F. Kuntsevich**<sup>\*</sup>, **D. V. Shabrov** (*B. I. Stepanov Institute of Physics, National Academy of Sciences of Belarus, 68 Nezavisimosti Prosp., Minsk, 220072, Belarus; e-mail: bkun@ifanbel.bas-net.by)* 

преобразователь (ЭОП). Такие системы позволяют видеть объекты в пределах сравнительно узкого слоя просматриваемого пространства (зоны видимости). АИСВ предназначены в основном для повышения дальности обнаружения и распознавания объектов при пониженной прозрачности атмосферы (туман, дымка, дождь и т. д.).

Одна из важных с практической точки зрения особенностей АИСВ — возможность в дополнение к простому наблюдению определять расстояние до объектов. Развитию методов определения расстояний до объектов и повышению их точности также уделяется в последнее время большое внимание, особенно с точки зрения построения трехмерных (3D) изображений (см., например, [1-4, 6]). Для дальнейшего рассмотрения представляется целесообразным условно выделить два способа наблюдения с помощью АИСВ. В первом случае расстояние между АИСВ и объектом фиксировано:  $S_{o6}$  = const. Его наблюдение осуществляется путем изменения временной задержки  $\Delta t_{3ad}$  между передними фронтами прямоугольных импульсов лазерной подсветки и строб-импульсов приемного блока, т. е. последовательно просматриваются вдоль оптической оси соседние слои пространства. Во втором случае фиксирована временная задержка:  $\Delta t_{3ad}$  = const. Это соответствует наблюдению объекта, передвигающегося вдоль оптической оси системы, либо рассмотрению совокупности объектов, находящихся в поле зрения на разных расстояниях, в том числе наблюдению на наклонных трассах.

Далее исследуем закономерности только для первого способа наблюдения. Поэтому кратко перечислим наиболее часто используемые методы определения расстояний до объектов для этого случая. Так, например, в [1, 10, 11] вычисляется некоторое средневзвешенное расстояние:

$$\langle s \rangle = (c/2n) [\Delta t_{3a\mu-0} + \Delta t_{crp} \sum_i t_i Q_i / \sum_i Q_i], \tag{1}$$

где с и n — скорость света и показатель преломления для окружающей среды;  $\Delta t_{3aq-0}$  — начальная (стартовая) задержка;  $\Delta t_{crp}$  — временной шаг стробирования, т. е. интервал времени, на который увеличивается (уменьшается)  $\Delta t_{3aq}$  при переходе к наблюдению последующего слоя пространства;  $Q_i$  и  $t_i$  — регистрируемая приемным блоком энергия и временная задержка для *i*-го шага (слоя или изображения).

Некоторым усовершенствованием указанного подхода, который демонстрирует более высокую точность определения расстояний, является использование предложенного в [2] выражения

$$\langle s \rangle = (c/2n) [\Delta t_{3a,l-0} + \Delta t_{crp} \sum_i w_i t_i Q_i / \sum_i w_i Q_i], \qquad (2)$$

где  $w_i$  ( $0 \le w_i \le 1$ ) — коэффициенты, учитывающие влияние шума и помех. В (1) и (2) не содержатся параметры, касающиеся формы импульса подсветки, вследствие этого он может иметь любую форму.

В ряде работ (см., например, [3, 12]) применяется методика, основанная на построении зависимости  $Q_i$  от номера шага *i*, которая затем аппроксимируется кусочно-линейной функцией. Расстояние до объекта при этом определяется с помощью некоторого эмпирического выражения с использованием двух найденных из зависимости характерных расстояний. В общем случае эти расстояния зависят от формы импульсов.

В последнее время для сокращения времени измерений и последующей обработки полученных результатов, а также реализации режима пространственного сверхразрешения (когда пространственное разрешение значительно меньше шага пространственного стробирования  $\Delta S_{\rm crp} = c \Delta t_{\rm crp}/2$ ; обычно  $\Delta t_{\rm crp} = \Delta t_{\rm na3}$ , где  $\Delta t_{\rm na3}$  — длительность импульса лазерной подсветки) предложены методы, основанные на использовании корреляции регистрируемой энергии в зависимости от расстояния для двух или более специальным образом полученных частично перекрывающихся в пространстве пространственно-энергетических профилей (ПЭП) [4, 5, 13, 14]. При этом используется либо трапециевидный, либо треугольный ПЭП. В этих случаях принципиальным моментом является необходимость реализации прямоугольной формы как импульсов подсветки, так и строб-импульсов. В работах [15-17] развит подход, позволяющий получить аналитические выражения для четырех характерных расстояний зоны видимости при условии, что импульсы подсветки и строб-импульсы имеют прямоугольную форму. Эти выражения используются затем для определения расстояний до объектов. В [18, 19] для второго способа наблюдения исследованы закономерности формирования ПЭП также для импульсов прямоугольной формы. Таким образом, в настоящее время при определении расстояний до объектов в ряде случаев получены практически важные результаты при условии, что импульсы подсветки и строб-импульсы имеют прямоугольную форму. Однако на практике это предположение часто не выполняется. В первую очередь это относится к форме импульсов лазерной подсветки.

В настоящей работе исследованы закономерности формирования зоны видимости и возможности определения расстояний до объектов с помощью АИСВ при первом способе наблюдения для случая, когда форма импульсов подсветки отличается от прямоугольной.

Закономерности формирования зоны видимости и определение расстояний для прямоугольной формы импульсов подсветки и строб-импульса. Для установления указанных закономерностей рассчитаны зависимости регистрируемой приемным блоком энергии E от расстояния задержки  $S_i - \Pi \Im \Pi$ :  $S_i = c \Delta t_{\text{зад-упр}}/2$ . Уточним, что  $\Delta t_{\text{зад-упр}}$  — временная задержка между передними прямоугольными управляющими импульсами драйверов ЭОП (приемный блок) и блока накачки лазеров подсветки. Обычно значение  $S_i$  отображается на индикаторной панели АИСВ. Далее в расчетах принято  $S_{of} = 40$  м.

На рис. 1 представлены результаты расчетов для прямоугольных импульсов (подсветки и стробирования). На примере кривой 5 (рис. 1, *a*) поясним, что точки *A* и  $\Gamma$  обычно являются начальной ( $S_{\text{нач}}$ ) и конечной ( $S_{\text{кон}}$ ) точками зоны видимости, а проекции точек *Б* и *B* на ось абсцисс — начальной ( $S_{\text{нач-100%}}$ ) и конечной ( $S_{\text{кон-100%}}$ ) точками, соответствующими регистрации входного излучения в течение всего (100 %) интервала времени  $\Delta t_{3\text{ОП}}$  включенного состояния ЭОП (при  $\Delta t_{3\text{ОП}} < \Delta t_{\text{лаз}}$ ), либо в течение 100 % длительности лазерного импульса (при  $\Delta t_{3\text{ОП}} > \Delta t_{\text{лаз}}$ ) (см., например, [15—17]). Другими словами,  $S_{\text{нач-100%}}$ ,  $S_{\text{кон-100%}}$  и  $S_{\text{кон}}$  — характерные расстояния (точки) зоны видимости, которые отсчитываются от АИСВ.



Рис. 1. Зависимость регистрируемой приемным блоком энергии  $E_{30\Pi}$  от расстояния  $S_i$ :  $a - \Delta t_{30\Pi} = 60$  нс,  $\Delta t_{\pi a 3} = 20$  (1), 30 (2), 60 (3), 120 (4) и 180 нс (5);  $\delta - \Delta t_{\pi a 3} = 60$  нс,  $\Delta t_{30\Pi} = 20$  (1), 30 (2), 60 (3), 120 (4) и 180 нс (5)

В табл. 1 приведены аналитические выражения для характерных расстояний, которые получены в [15] для прямоугольной формы обоих импульсов при различных соотношениях между длительностями  $\Delta t_{3O\Pi}$  и  $\Delta t_{na3}$ . Поясним, что длина зоны видимости  $\Delta S_{3B} = S_{\kappa o \mu} - S_{\mu a \nu}$ ,  $\Delta S_{100\%} = S_{\kappa o \mu - 100\%} - S_{\mu a \nu - 100\%}$ ,  $\Delta S_{\phi p} = S_{\mu a \nu - 100\%} - S_{\mu a \nu}$  (длина фронта) и  $\Delta S_{c\Pi} = S_{\kappa o \mu} - S_{\kappa o \mu - 100\%}$  (длина спада). В табл. 1 используется временная задержка  $\Delta t_{3aq-x}$ , которая вводится следующим образом:  $\Delta t_{3aq} = \Delta t_{3aq-ynp} + \Delta t_{3aq-x}$ , где  $\Delta t_{3aq-x}$  — истинная временная задержка,  $\Delta t_{3aq-x}$  — дополнительная задержка, обусловленная, например, как конструктивными особенностями системы, так и тем обстоятельством, что генерация излучения начинается с некоторой задержкой после подачи прямоугольного управляющего сигнала на драйвер блока накачки лазеров. Введение параметра  $\Delta t_{3aq-x}$  обусловлено необходимостью согласования аналитических выражений с результатами экспериментальных измерений.

Из табл. 1 видно, что при  $\Delta t_{\text{лаз}} = \Delta t_{3 \text{ОП}}$  точки  $S_{\text{нач-100\%}}$  и  $S_{\text{кон-100\%}}$  "сливаются" в одну  $S_{\text{макс}}$ . Это означает, что ПЭП имеет вид треугольника. При  $\Delta t_{\text{лаз}} \neq \Delta t_{3 \text{ОП}}$  ПЭП имеет вид трапеции с длиной верхнего основания  $\Delta S_{100\%}$ . Из табл. 1 также следует, что при использовании любого из измеренных характерных расстояний можно найти расстояние до объекта  $S_{\text{об}}$ , если известны времена  $\Delta t_{\text{лаз}}$ ,  $\Delta t_{3 \text{ОП}}$  и  $\Delta t_{3 \text{ад-х}}$ . Другие способы определения расстояний для данного способа наблюдения указаны в [15].

На рис. 1 обозначено расстояние до объекта  $S_{ob}$ . С учетом формул табл. 1 в зависимости от соотношения  $\Delta t_{30\Pi}$  и  $\Delta t_{\pi a3}$  значению  $S_{ob}$  соответствуют различные характерные расстояния, смысл которых понятен из рис. 1. Следует отметить, что, по-видимому, впервые зависимости, аналогичные приведенным на рис. 1, были получены в [18, 19] путем численных расчетов для второго способа наблюдения. Они соответствуют случаю  $\Delta t_{3aR-x} = 0$ .

Параметр	$\Delta t_{\pi a 3} > \Delta t_{\Im O \Pi}$	$\Delta t_{\pi a 3} < \Delta t_{\Im O \Pi}$	$\Delta t_{\pi a 3} = \Delta t_{\Im O \Pi}$					
Характерные расстояния (дистанции)								
$S_{{\scriptscriptstyle \mathrm{H}}a{\scriptscriptstyle \mathrm{H}}}$	$S_{\rm ob} - c(\Delta t_{\rm BOH} + \Delta t_{\rm 3ag-x})/2$	$S_{ m of} - c(\Delta t_{ m HOT} + \Delta t_{ m sag-x})/2$	$S_{0 6} - c(\Delta t_{30\Pi} + \Delta t_{3aJ-x})/2$					
$S_{ m hau-100\%}$	$S_{ m o6} - c\Delta t_{ m sag-x}/2$	$S_{\text{of}} - c(\Delta t_{\text{ЭОП}} - \Delta t_{\text{лаз}} + \Delta t_{\text{зад-x}})/2$	$S_{\text{макс}} = S_{\text{об}} - c\Delta t_{\text{зад-x}}/2$					
$S_{ m koh-100\%}$	$S_{\rm ob} + c(\Delta t_{\rm Ja3} - \Delta t_{\rm OOI} - \Delta t_{\rm 3aJ-x})/2$	$S_{ m of}-c\Delta t_{ m 3a, -x}/2$						
$S_{ m KOH}$	$S_{ m o 6} + c(\Delta t_{ m na3} - \Delta t_{ m 3ag-x})/2$	$S_{ m of} + c(\Delta t_{ m Ja3} - \Delta t_{ m 3aJ-x})/2$	$S_{\text{of}} + c(\Delta t_{\text{лаз}} - \Delta t_{\text{зад-x}})/2$					
	Длин	ы характерных участков						
$\Delta S_{3B}$	$c(\Delta t_{\pi a 3} + \Delta t_{OOI})/2$	$c(\Delta t_{\pi a 3} + \Delta t_{\Theta O \Pi})/2$	$c(\Delta t_{\pi a 3} + \Delta t_{OOII})/2$					
$\Delta S_{100\%}$	$c(\Delta t_{\text{лаз}} - \Delta t_{\text{ЭОП}})/2$	$c(\Delta t_{ m ЭО\Pi}-\Delta t_{ m лаз})/2$	-					
$\Delta S_{ m dpp}$	$c\Delta t_{ m HOH}/2$	$c\Delta t_{ m JBB}/2$	$c\Delta t_{ m OOI}/2$					
$\Delta S_{ m c\pi}$	$c\Delta t_{ m HOII}/2$	$c\Delta t_{ m JB3}/2$	$c\Delta t_{\pi a 3}/2$					
	Pa	сстояние до объекта						
$S_{ m o }$	$S_{\text{Hay}} + c(\Delta t_{\text{ЭОП}} + \Delta t_{\text{зад-x}})/2$	$S_{\text{нач}} + c(\Delta t_{\text{ЭОП}} + \Delta t_{\text{зад-x}})/2$	$S_{\text{Hay}} + c(\Delta t_{\text{ЭОП}} + \Delta t_{\text{зад-x}})/2$					
$S_{ m o }$	$S_{ ext{Hay-100\%}} + c\Delta t_{ ext{3ad-x}}/2$	$S_{\text{Hay-100\%}} + c(\Delta t_{\text{ЭОП}} - \Delta t_{\text{лаз}} + \Delta t_{\text{зад-x}})/2$						
$S_{ m o }$	$S_{ ext{кон-100\%}}$ - $c(\Delta t_{ ext{лаз}} - \Delta t_{ ext{ЭОП}} -$	$S_{\text{кон-100\%}} + c\Delta t_{\text{зад-x}}/2$	$S_{\text{макс}} + c\Delta t_{\text{зад-x}}/2$					
	$-\Delta t_{3a,t-x})/2$							
$S_{00}$	$S_{\text{KOH}} - c(\Delta t_{\text{HA3}} - \Delta t_{3\text{AH-Y}})/2$	$S_{\text{KOH}} - c(\Delta t_{\text{HA3}} - \Delta t_{\text{3AH-Y}})/2$	$S_{\text{KOH}}-c(\Delta t_{\text{HA}}-\Delta t_{\text{HA}})/2$					

Таблица 1. Формулы для расчета характерных расстояний, длин участков и расстояния до объекта для импульсов прямоугольной формы

На практике форма импульсов подсветки отличается от прямоугольной. На рис. 2 представлены осциллограммы световых импульсов АИСВ, разработанных в Институте физики НАН Беларуси (Минск) [15]. В данном случае блок подсветки содержит четыре импульсных полупроводниковых лазера типа Л13 [20]. При малой длительности форма импульса подсветки близка к треугольной или гауссовой (кривая 5), а при увеличении длительности приближается к трапециевидной.



Рис. 2. Формы импульсов подсветки, содержащих в осветительном блоке разработанных АИСВ четыре импульсных полупроводниковых излучателя: длительность импульса по основанию 200 (1), 160 (2), 120 (3), 80 (4) и 40 нс (5)

Рассмотрим случаи треугольной и трапециевидной форм импульсов подсветки, которые близки к реализуемым на практике и в то же время позволяют наглядно объяснить суть предлагаемого эмпирического подхода определения расстояний. Далее предполагается, что строб-импульс имеет прямоугольную форму.

АИСВ с треугольной формой импульсов подсветки. На рис. 3 приведены результаты расчетов для импульсов треугольной формы с параметрами 0.5-0.5. Здесь и далее при задании параметров формы первое и второе числа равны, соответственно, отношению длительности фронта и спада к длительности импульса. Под длительностью импульса понимаем его длительность по основанию. Из рис. 3, *a* (кривые *1—3*) и рис. 3, *б* (кривые *3—5*) следует, что при  $\Delta t_{\text{лаз}} \leq \Delta t_{\text{ЭОП}}$  расстояние до объекта, как и в случае прямоугольных импульсов, можно определить, измерив одно из характерных расстояний:  $S_{\text{макс}}$  (при  $\Delta t_{\text{лаз}} = \Delta t_{\text{ЭОП}}$ ) или  $S_{\text{кон-100%}}$  ( $\Delta t_{\text{лаз}} < \Delta t_{\text{ЭОП}}$ ). Чтобы определить  $S_{\text{макс}}$  и  $S_{\text{об}}$  при

 $\Delta t_{\text{лаз}} > \Delta t_{3O\Pi}$  (кривые 4 и 5 на рис. 3, *а* и кривые *l* и 2 на рис. 3, *б*), обратимся к рис. 4. Линия  $S_0$  условно изображает поверхности излучающего и приемного блоков АИСВ. Линия  $S_{3O\Pi}$  удалена от нее на расстояние  $S_{3O\Pi} = c\Delta t_{3O\Pi}$ . Линия  $S_{o6}$  соответствует расположению объекта наблюдения. Треугольники условно изображают импульсы подсветки. Стрелка указывает, что после отражения от объекта импульсов подсветки. Стрелка указывает, что после отражения от объекта импульс приближается к приемному блоку. Рис. 4 соответствует расположению импульсов подсветки в момент включения строб-импульса. Из рис. 4 следует, что за время  $\Delta t_{3O\Pi}$  приемным блоком зарегистрирована энергия, пропорциональная площади фигуры, ограниченной линиями  $S_0$  и  $S_{3O\Pi}$ . При этом импульсы подсветки расположены относительно линий  $S_0$  и  $S_{3O\Pi}$  таким образом, что регистрируется максимально возможная энергия  $E_{\text{макс}}$ , которая соответствует максимумам кривых на рис. 3, для которых  $\Delta t_{\text{лаз}} > \Delta t_{3O\Pi}$ . Аналогично развитому в [15—17] подходу с помощью геометрических соотношений для пути, прошедшего передним фронтом импульса подсветки (рис. 4, *a*;  $\Delta t_{\text{лаз}} = 2\Delta t_{3O\Pi}$ ), можно записать  $S_{\text{o6}} + S_{\text{o6}} + (1/4)c\Delta t_{\text{лаз}} = c\Delta t_{3\text{ад-упр}} + c\Delta t_{3\text{ад-упр}} + c\Delta t_{3\text{ад-упр}} = 2S_{\text{макс}}$  получаем

$$S_{\text{Make}} = S_{\text{of}} + (1/8)c\Delta t_{\text{Jaa}} - c\Delta t_{\text{Jaa}-x}/2.$$
 (3)

Рис. 4, б построен при выполнении условия  $\Delta t_{\text{паз}} = 3\Delta t_{3\text{ОП}}$  для данной формы импульса. Остальные случаи на рис. 4 соответствуют формам импульса 2/6-4/6 и 4/6-2/6 при двух различных соотношениях:  $\Delta t_{\text{паз}} = 2\Delta t_{3\text{ОП}}$  и  $\Delta t_{\text{паз}} = 3\Delta t_{3\text{ОП}}$ . Проделав выкладки, аналогичные при получении выражения (3), можно найти  $S_{\text{макс}}$  для каждого из случаев рис. 4. Полученные выражения приведены в табл. 2. Для лучшего восприятия коэффициенты формы импульса заданы в виде дробей.



Рис. 3. Зависимость регистрируемой приемным блоком энергии  $E_{\text{ЭОП}}$  от расстояния  $S_i$ для импульса подсветки треугольной формы с относительными длительностями фронта 3/6 и спада 3/6:  $a - \Delta t_{\text{ЭОП}} = 60$  нс,  $\Delta t_{\text{лаз}} = 20$  (1), 30 (2), 60 (3), 120 (4) и 180 нс (5);  $\delta - \Delta t_{\text{лаз}} = 60$  нс,  $\Delta t_{\text{ЭОП}} = 20$  (1), 30 (2), 60 (3), 120 (4) и 180 нс (5)



Рис. 4. Схема, поясняющая образование расстояния  $S_{\text{макс}}$ , соответствующего максимальной регистрируемой приемным блоком энергии при треугольной форме импульса подсветки: относительные длительности фронта и спада: 3/6-3/6 (*a*, *б*), 2/6-4/6 (*e*, *г*), 4/6-2/6 (*d*, *e*);  $\Delta t_{\text{лаз}} = 2\Delta t_{\text{ЭОП}}(a, e, d), \Delta t_{\text{лаз}} = 3\Delta t_{\text{ЭОП}}(b, c, e)$ 

$\Delta t_{\pi a 3} = 2 \Delta t_{\Im O \Pi}$	$\Delta t_{\pi a 3} = 3 \Delta t_{\Im O \Pi}$					
Относительные длительности фронта и спада 3/6-3/6						
$S_{\max} = S_{ob} + (1/8)c\Delta t_{\max} - c\Delta t_{3aJ-x}/2$	$S_{\max} = S_{o6} + (1/6)c\Delta t_{\pi a3} - c\Delta t_{3a,x}/2$					
Относительные длительности фронта и спада 2/6-4/6						
$S_{\max} = S_{ob} + (1/12)c\Delta t_{\max} - c\Delta t_{\max}/2$	$S_{\max} = S_{ob} + (1/9)c\Delta t_{\pi a 3} - c\Delta t_{3a \pi - x}/2$					
Относительные длительности фронта и спада 4/6-2/6						
$S_{\max} = S_{ ext{of}} + (1/6)c\Delta t_{ ext{na3}} - c\Delta t_{ ext{sag-x}}/2$	$S_{\max} = S_{\text{of}} + (2/9)c\Delta t_{\text{Ja3}} - c\Delta t_{\text{JaJ}-x}/2$					

Т а б л и ц а 2. Формулы для расчета S<sub>max</sub> при треугольной форме импульсов подсветки

АИСВ с трапециевидной формой импульсов подсветки. Из рис. 2 видно, что в ряде случаев форма импульсов подсветки может быть аппроксимирована трапецией. Результаты расчетов для симметричного трапециевидного импульса с параметрами 1/4 (относительная длина фронта) и 1/4 (относительная длина спада) приведены на рис. 5. Как и выше, при  $\Delta t_{na3} \leq \Delta t_{\Theta O \Pi}$  расстояние до объекта можно определить, измерив либо  $S_{\text{макс}}$  при  $\Delta t_{na3} = \Delta t_{\Theta O \Pi}$  (кривые 3), либо  $S_{\text{кон-100%}}$  при  $\Delta t_{na3} < \Delta t_{\Theta O \Pi}$  (кривые 1 и 2 на рис. 5, *a* и кривые 4 и 5 на рис. 5, *б*). При  $\Delta t_{na3} > \Delta t_{\Theta O \Pi}$  кривая 4 на рис. 5, *a* и кривая 2 на рис. 5, *б* имеют колоколообразную форму. На кривых 5 и 1 (рис. 5) появляются платообразные участки. Причина их образования объяснена ниже. Чтобы получить выражения для определения расстояния до характерных точек при  $\Delta t_{na3} > \Delta t_{\Theta O \Pi}$  расстоянию  $S_{\text{макс}}$  (рис. 6, *a*), или начальной  $S_{\text{нач-пл}}$  (рис. 6, *б*) и конечной  $S_{\text{кон-пл}}$  (рис. 6, *e*) точкам платообразного участка. Для пути, пройденного передним фронтом импульса (рис. 6, *a*), можно записать:  $S_{o6} + S_{o6} + (1/4)c\Delta t_{na3} = c\Delta t_{зад-упр} + c\Delta t_{зад-x}$ . С учетом  $c\Delta t_{зад-упр} = 2S_{\text{макс}}$  получаем

$$S_{\text{Make}} = S_{\text{of}} + (1/8)c\Delta t_{\text{Jaa}} - c\Delta t_{\text{Jaa}-x}/2.$$
(4)

Рис. 6, б соответствует начальной точке  $S_{\text{нач-пл}}$  образования плато. Для переднего фронта импульса с учетом геометрии  $S_{\text{of}} + S_{\text{of}} + (1/4)c\Delta t_{\text{na3}} = c\Delta t_{\text{зад-упр}} + c\Delta t_{\text{зад-упр}} = 2S_{\text{нач-пл}}$  получаем

$$S_{\text{Hay-III}} = S_{\text{ob}} + (1/8)c\Delta t_{\text{III}} - c\Delta t_{\text{SAI-x}}/2.$$
(5)

Используя рис. 6, б, аналогичным образом для точки Sкон-пл получаем

$$S_{\text{кон-пл}} = S_{\text{об}} + (5/24)c\Delta t_{\text{лаз}} - c\Delta t_{\text{зал-x}}/2.$$
(6)

Из анализа рис. 6 следует, что плато может образоваться только в случае, если длительность верхнего основания трапеции  $(\Delta t_{\text{лаз}} - \Delta t_{\phi p} - \Delta t_{cn}) > \Delta t_{3O\Pi}$ , где  $\Delta t_{\phi p}$  и  $\Delta t_{cn}$  — длительности фронта и спада. Таким образом, при треугольной форме импульса подсветки плато не образуется. В табл. З приведены выражения для характерных расстояний для некоторых конкретных форм импульсов.

При  $\Delta t_{\text{лаз}} > \Delta t_{\text{ЭОП}}$  расстояния до объекта вычисляются с использованием выражений (3)—(6) и соотношений из табл. 2 и 3. Следует отметить, что для проверки работоспособности данного эмпирического метода проведено сравнение результатов, полученных с использованием аналитических выражений для характерных расстояний, и данных на рис. 3 и 5. Показано их полное соответствие.



Рис. 5. Зависимость регистрируемой приемным блоком энергии  $E_{30\Pi}$  от расстояния  $S_i$  для импульса подсветки трапециевидной формы с относительными длительностями фронта 1/4 и спада 1/4:  $a - \Delta t_{30\Pi} = 60$  нс,  $\Delta t_{\pi a 3} = 20$  (1), 30 (2), 60 (3), 120 (4) и 180 нс (5);  $\delta - \Delta t_{\pi a 3} = 60$  нс,  $\Delta t_{30\Pi} = 20$  (1), 30 (2), 60 (3), 120 (4) и 180 нс (5)

Таким образом, в предлагаемом эмпирическом методе определения расстояний до характерных точек в случае импульсов непрямоугольной формы при  $\Delta t_{\text{лаз}} > \Delta t_{\Theta\Pi}$  необходимо заранее знать форму импульса подсветки, а также длительности  $\Delta t_{\text{лаз}}$  и  $\Delta t_{\Theta\Pi}$ . Затем строится геометрическая схема с соблюдением следующих условий. В момент включения прямоугольного строб-импульса импульс подсветки располагается таким образом, чтобы за время длительности строб-импульса регистрируемый приемным блоком сигнал был максимальным. Выражения для искомых расстояний выводятся с использованием геометрических соотношений.

Параметр	$\Delta t_{\pi a 3} = 2 \Delta t_{\Theta O \Pi}$	$\Delta t_{\pi a 3} = 3 \Delta t_{\Im O \Pi}$					
	Относительные длительности фронта и спада 1/4-1/4						
$S_{ m makc}$	$S_{\rm ob} + (1/8)c\Delta t_{\rm JBB} - c\Delta t_{\rm BBJ-x}/2$						
$S_{ m Hau-nn}$		$S_{ m o6} + (1/8)c\Delta t_{ m Ja3} - c\Delta t_{ m 3aJ-x}/2$					
$S_{ m koh-nn}$		$S_{ m o6} + (5/24)c\Delta t_{ m \pia3} - c\Delta t_{ m 3ag}/2$					
	Относительные длительности фронта и спада 1/5-2/5						
$S_{ m makc}$	$S_{\rm of} + (1/12)c\Delta t_{\rm Ja3} - c\Delta t_{\rm 3aJ-x}/2$						
$S_{ m Hau-nn}$		$S_{ m o6} + (1/10)c\Delta t_{ m Ja3} - c\Delta t_{ m 3ad-x}/2$					
$S_{ m koh-nn}$		$S_{ m o6} + (2/15)c\Delta t_{ m na3} - c\Delta t_{ m 3ag-x}/2$					
	Относительные длительности фронта и спада 2/5-1/5						
S <sub>Makc</sub>	$S_{\rm of} + (1/6)c\Delta t_{\rm Ja3} - c\Delta t_{\rm 3aJ-x}/2$						
$S_{{\scriptscriptstyle \mathrm{Ha}}{\scriptscriptstyle \mathrm{H}}{\scriptscriptstyle \mathrm{-}}{\scriptscriptstyle \mathrm{\Pi}}{\scriptscriptstyle \mathrm{\Pi}}}$		$S_{\rm ob} + (1/5)c\Delta t_{\rm Ja3} - c\Delta t_{\rm Jag-x}/2$					
Srow up		$S_{e5} + (7/30)c\Delta t_{res} - c\Delta t_{earl} u/2$					

Т	а б.	ли	ца	3.	Формулы	для	расчета	характе	рных	расстоя	яний	при
			-	гра	пециевидн	ой ф	рорме им	пульса	подсве	етки		



Рис. 6. Схема образования расстояния  $S_{\text{макс}}$ , соответствующего максимальной регистрируемой приемным блоком энергии при трапециевидной форме импульса подсветки: относительные длительности фронта и спада 1/4-1/4;  $\Delta t_{\text{лаз}} = 2\Delta t_{\text{ЭОП}}(a)$  и  $3\Delta t_{\text{ЭОП}}(f, e)$ 

Независимость ПЭП от формы импульса подсветки при  $\Delta t_{\text{лаз}} \leq \Delta t_{\text{ЭОП}}$  можно показать с помощью рис. 6, *a*, предположив  $\Delta t_{\text{лаз}} = \Delta t_{\text{ЭОП}}$  или  $\Delta t_{\text{лаз}} < \Delta t_{\text{ЭОП}}$ . В этих случаях регистрируется вся энергия импульса, ограниченная линиями  $S_0$  и  $S_{\text{ЭОП}}$ , какую бы форму он не имел.

При  $\Delta t_{\text{лаз}} \leq \Delta t_{\text{ЭОП}}$  характерные расстояния не зависят от формы импульса подсветки и для определения расстояний до объектов можно использовать подходы, развитые ранее для прямоугольных импульсов (см., например, [3, 12, 15—17]). В то же время фронты и спады ПЭП не являются линейными функциями расстояния (см. рис. 3 и 5), поэтому методы [4, 5, 13, 14] не работают. Выше рассмотрены простейшие случаи импульсов треугольной и трапециевидной форм, однако этот эмпирический подход легко распространяется и на другие формы импульсов подсветки.

**Результаты и их обсуждение.** Исследования проведены с помощью АИСВ, разработанной в Институте физики НАН Беларуси. В ней используется опорная (реперная) частота управляющих импульсов  $f_0 = 200$  МГц, что соответствует минимально возможному измеряемому интервалу времени  $t_0 = 5$  нс. Тогда для минимально возможного изменяемого (измеряемого) интервала расстояний получаем:  $\Delta S_i = ct_0/2 = 0.75$  м (пространственный шаг сканирования). Отсюда следует, что данное значение опорной частоты позволяет в принципе измерять расстояния с точностью 0.75 м. Поскольку величина  $S_{\text{макс}}$  определялась на основании визуального наблюдения оператором изображения объекта на видеомониторе, для уменьшения погрешности измерений искомое расстояние сначала определялось при удалении зоны видимости от АИСВ, а затем при приближении. Из выражений (3) и (4) следует, что значение

$$k = S_{\text{Makc}} - S_{\text{ob}},\tag{7}$$

которое назовем калибровочной постоянной, не зависит от расстояния до объекта. На этом основан предложенный метод определения расстояний.

В табл. 4 представлены измеренные значения  $S_{\text{макс}}$ , а также вычисленные k и его среднее значение  $k_{\text{ср}}$ . Видно, что разброс значений k практически не превышает пространственного шага стробирования для двух  $\Delta t_{\text{лаз}}$ . В соответствии с (3) и (4) большим значениям  $\Delta t_{\text{лаз}}$  должны соответствовать большие k. Это подтверждают результаты измерений (табл. 4).

<i>S</i> <sub>об</sub> , м	$\Delta t_{\pi a3} =$	120 нс	$\Delta t_{\pi a 3} = 160 \text{ Hc}$		
	<i>S</i> <sub>макс</sub> , м	k	$S_{\rm макс}$ , м	k	
32.1	38.5	6.4	42.0	9.9	
61.7	67.5	5.8	71.0	9.3	
118.0	124.1	6.1	127.1	9.1	
$k_{\rm cp}$		6.1		9.4	

Таблица 4. Результаты измерения расстояния S<sub>макс</sub>

Таким образом, измерив, например, с помощью рулетки расстояние до объекта  $S_{o6}$  и определив для него  $S_{\text{макс}}$ , с помощью (7) можно вычислить калибровочную постоянную k. Для уменьшения погрешности k можно провести измерения для нескольких объектов и найти  $k_{cp}$ . После этого расстояние до любого другого объекта можно определить с использованием найденной величины k ( $k_{cp}$ ) и измеренного для него  $S_{\text{макс}}$ . При таком подходе не требуется знания конкретных параметров самой АИСВ (см. (3)—(6)), однако калибровочная постоянная в общем случае должна определяться для конкретных значений  $\Delta t_{na3}$ . Аналогично метод калибровочных постоянных можно использовать для определения граничных точек платообразного участка (5) и (6), а затем на их основе вычислять расстояния до объекта.

Заключение. На примере импульсов подсветки треугольной и трапециевидной форм исследовано влияние отклонения от прямоугольной формы на пространственно-энергетический профиль сигнала, который регистрируется активно-импульсными системами видения при изменении временной задержки между передними фронтами строб-импульса и импульса подсветки. Установлено, что если длительность импульса подсветки  $\Delta t_{\text{лаз}}$  меньше или равна длительности строб-импульса  $\Delta t_{ЭОП}$ , то характерные расстояния совпадают со случаем импульсов прямоугольной формы. Это объясняется тем, что приемным блоком поглощается вся энергия импульса подсветки независимо от его формы. При этом для определения расстояния до объекта можно использовать полученные ранее выражения для импульсов прямоугольной формы.

При  $\Delta t_{\text{лаз}} > \Delta t_{\text{ЭОП}}$  в случае импульсов подсветки треугольной формы пространственноэнергетический профиль приобретает колоколообразный вид. Для импульсов трапециевидной формы пространственно-энергетический профиль имеет колоколообразную форму с наличием или отсутствием платообразного участка. Платообразный участок появляется, когда длительность верхнего основания трапеции превышает длительность строб-импульса. Предложен эмпирический метод определения характерных расстояний до максимума пространственно-энергетического профиля и граничных точек платообразного участка, которые затем могут быть использованы для вычисления расстояния до объекта. Эмпирический метод основан на специальным образом построенной графической схеме пространственно-временного перекрытия отраженных от объекта лазерных импульсов подсветки и строб-импульсов приемного блока и предполагает предварительное знание формы импульса подсветки и длительностей  $\Delta t_{\text{лаз}}$  и  $\Delta t_{\text{ЭОП}}$ . С использованием калибровочных постоянных предложен метод определения расстояния до объекта, который не требует знания временных параметров системы ( $\Delta t_{\text{лаз}}$ ,  $\Delta t_{\text{ЭОП}}$  и  $\Delta t_{\text{зад-x}}$ ), и экспериментально подтверждена его работоспособность. Авторы выражают благодарность И. Н. Пучковскому, С. С. Шавелю за помощь в проведении измерений и В. П. Кабашникову за обсуждение статьи.

- [1] J. Busck, H. Heiselberg. Proc. SPIE, 5412 (2004) 257-263
- [2] S. Y. Chua, X. Wang, N. Guo, C. S. Tan, T. Y. Chai, G. L. Seet. J. Eur. Opt. Soc. Rapid, 11 (2016) 16015
- [3] B. Goehler, P. Lutzmann. Proc. SPIE, 7835 (2010) 1—12
- [4] M. Laurenzis, F. Christnacher, D. Monnin. Opt. Lett., 32 (2007) 3146-3148
- [5] M. Laurenzis, E. Bacher. Appl. Opt., 50 (2011) 3824—3828
- [6] X. Wang, Y. Li, Y. Zhou. Opt. Express, 23 (2015) 7820
- [7] В. М. Белоконев, В. Г. Волков, В. Л. Саликов, Б. А. Случак. Прикл. физика, № 4 (2013) 16—22
- [8] Б. И. Авдоченко, Е. В. Зайцев, Ю. Р. Кирпиченко, М. И. Курячий, И. Н. Пустынский. Тез. 11-й междунар. конф. "Телевидение: передача и обработка изображений", С.-Петербург (2014) 117—119

[9] А. В. Голицын, П. В. Журавлев, Г. Е. Журов, А. В. Корякин, А. П. Чихонадских, В. Б. Шлишевский, Т. В. Яшина. Изв. вузов. Приборостроение, **52** (2009) 27—34

- [10] D. Li, H.-J. Yang, S.-P. Zhou. J. Electron. Sci. Technol., 9 (2011) 261-264
- [11] E. Bovenkamp, K. Schutte. Proc. SPIE, 7684 (2010) 76840Z
- [12] B. Goehler, P. Lutzmann. Proc. SPIE, 8897 (2013) 889708

[13] X. Wang, Y. Li, Y. Zhou. Appl. Opt., 52 (2013) 7399-7046

[14] X. Wang, Y. Cao, W. Cui, X. Liu, S. Fan, Y. Zhou, Y. Li. Proc. SPIE, 9260 (2014) 92604L

[15] В. В. Горобец, В. В. Кабанов, В. П. Кабашников, Б. Ф. Кунцевич, Н. С. Метельская, Д. В. Шабров. Журн. прикл. спектр., 81, № 2 (2014) 283—291 [V. V. Gorobets, V. V. Kabanov, V. P. Kabashnikov, B. F. Kuntsevich, N. S. Metelskaya, D. V. Shabrov. J. Appl. Spectr., 81 (2014) 279—287]

[16] В. В. Горобец, В. В. Кабанов, В. П. Кабашников, Б. Ф. Кунцевич, Н. С. Метельская, Д. В. Шабров. Журн. прикл. спектр., 82, № 1 (2015) 68—75 [V. A. Gorobets, V. V. Kabanov, V. P. Kabashnikov, B. F. Kuntsevich, N. S. Metelskaya, D. V. Shabrov. J. Appl. Spectr., 82 (2015) 63—71]

[17] В. В. Горобец, В. П. Кабашников, Б. Ф. Кунцевич, Н. С. Метельская, Д. В. Шабров. Журн. прикл. спектр., 83, № 1 (2016) 105—112 [V. A. Gorobets, V. P. Kabashnikov, B. F. Kuntsevich, N. S. Metelskava, D. V. Shabrov, J. Appl. Spectr., 83 (2016) 93—99]

[18] X. Wang, Y. Zhou, Y. He, S. Fan, Y. Liu. Proc. SPIE, 8192 (2011) 819218

[19] X. Wang, Y. Zhou, S. Fan, Y. Liu. Proc. SPIE, 8200 (2011) 82000V

[20] htpp://www.inject-laser.ru