

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ЗОНЫ ВИДИМОСТИ АКТИВНО-ИМПУЛЬСНЫМИ СИСТЕМАМИ ВИДЕНИЯ ПРИ ФИКСИРОВАННОМ РАССТОЯНИИ ЗАДЕРЖКИ С УЧЕТОМ ФОРМЫ ИМПУЛЬСА ПОДСВЕТКИ

Б. Ф. Кунцевич^{1*}, Д. В. Шабров²

УДК 621.384.3:621.391

¹ ГНПО “Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника”, 220072, Минск, Беларусь; e-mail: bkun@ifanbel.bas-net.by

² Институт физики НАН Беларуси, Минск, 220072, Беларусь

(Поступила 22 февраля 2021)

Численно изучены пространственно-энергетические профили (ПЭП) регистрируемого сигнала при различных формах импульса подсветки и соотношениях между длительностями импульсов подсветки τ_p и регистрации τ_g при фиксированном расстоянии задержки. Установлено, что при $\tau_p < \tau_g$ и $\tau_p = \tau_g$ характерные расстояния зоны видимости не зависят от формы импульса подсветки. Для их определения можно использовать полученные ранее выражения для импульсов подсветки прямоугольной формы. При $\tau_p > \tau_g$ ПЭП для рассматриваемых случаев представляет собой, как правило, выпуклую асимметричную кривую с одним максимумом в точке S_{\max} . Для простейших форм импульсов подсветки, моделируемых треугольниками или трапециями, получены аналитические выражения, которые позволяют вычислить значение S_{\max} по известным расстоянию задержки и длительности импульса подсветки. Для соотношения $\tau_p > \tau_g$ предложен метод калибровочной постоянной для определения расстояния S_{\max} при реальной форме импульса подсветки.

Ключевые слова: активно-импульсная система видения, пространственно-энергетический профиль, расстояние задержки, характерные расстояния зоны видимости, положение максимума сигнала.

Herein, the spatial-energy profiles (SEPs) of the recorded signal was numerically studied at different shapes of the illumination pulse and ratios between the durations of illumination τ_p and registration τ_g pulses at a fixed delay distance. It was established that at $\tau_p < \tau_g$ and $\tau_p = \tau_g$ the characteristic distance of visibility ranges do not depend on the shape of the illumination pulse. For their determination it is possible to use the previously obtained expressions for illumination pulses of a rectangular shape. As a rule, for the cases considered at $\tau_p > \tau_g$ SEP is a convex asymmetric curve with one maximum in a point S_{\max} . For the simplest forms of illumination pulses designed by triangles or trapezoids the analytical expressions were obtained, allowing calculation of the value S_{\max} on the known delay distance and the duration of the illumination pulse. For the ratio $\tau_p > \tau_g$, the method of the calibration constant was also proposed to determine the distance S_{\max} at a real shape of the illumination pulse.

Keywords: active-pulse vision system, spatial-energy profile, distance of delay, characteristic distances of visibility range, position of signal maximum.

Введение. Для решения различных научных и практических задач в настоящее время широко используются активно-импульсные системы видения (АИСВ) [1—11]. В АИСВ осуществляется в частотно-импульсном режиме подсветка объектов наблюдения лазерным излучением с типичной длительностью τ_p от единиц наносекунд до нескольких микросекунд. Синхронно с лазерной подсветкой, но с некоторой задержкой по времени t_d на короткое время τ_g включается фотоприемник (обычно электронно-оптический преобразователь (ЭОП)). АИСВ позволяют осуществлять наблюдение сцены в сравнительно узкой полосе пространства, называемой зоной видимости.

REGULARITIES IN THE FORMATION OF THE DISTANCE OF VISIBILITY OF ACTIVE-PULSE VISION SYSTEMS AT A FIXED DELAY DISTANCE WITH TAKING INTO ACCOUNT THE SHAPE OF THE ILLUMINATION PULSE

B. F. Kuntsevich^{1*}, D. V. Shabrov² (¹SSPA “Optics, Optoelectronics and Laser Technology”, Minsk, 220072, Belarus; e-mail: bkun@ifanbel.bas-net.by; ²B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, 220072, Belarus)

Первоначально АИСВ предназначались для наблюдения в условиях пониженной прозрачности атмосферы (туман, дымка, дождь, снег и т. д.), поскольку позволяли отсеять сильный сигнал обратного рассеяния от близко расположенного слоя окружающей среды. Одной из важных с практической точки зрения особенностей АИСВ является возможность в дополнение к простому наблюдению определять расстояние до объектов. Поэтому развитию методов определения расстояний до объектов и повышению их точности в последнее время уделяется большое внимание, особенно с точки зрения построения трехмерных (3D) изображений [9, 12, 13].

Целесообразно выделить два способа наблюдения с помощью АИСВ [14]. При первом способе объект находится на фиксированном расстоянии от АИСВ. Его наблюдение осуществляется путем последовательного изменения (увеличения или уменьшения) временной задержки t_d между передними фронтами импульсов подсветки и регистрации (экспозиции) фотоприемника (или строб-импульса). При этом изображение объекта постепенно появляется на экране видеомонитора, затем его яркость достигает максимума, уменьшается и на конечном этапе исчезает. Этот способ наблюдения иногда называют методом пространственного или временного сканирования, поскольку зона видимости перемещается вдоль оптической оси системы.

При втором способе временная задержка является фиксированной: $t_d = \text{const}$. Это соответствует либо наблюдению объекта, передвигающегося в пределах зоны видимости АИСВ, либо рассмотрению совокупности объектов, находящихся в зоне видимости на разных расстояниях, в том числе наблюдению на наклонных трассах. Поскольку в дальнейшем исследования проводятся только для второго способа наблюдения, перечислим кратко основные методы определения расстояний и построения трехмерных изображений для этого случая.

В работе [13] предложен метод корреляции расстояния—интенсивность. Специальным образом регистрируются пространственно-энергетические профили (ПЭП) трапециевидной формы принимаемых сигналов как минимум для двух зон видимости, которые частично пространственно перекрываются. С использованием отношения сигналов из определенного диапазона расстояний перекрывающихся зон вычисляется расстояние до элемента изображения, соответствующего каждому пикселю. В [12] предложен аналогичный по физическому смыслу метод с той лишь разницей, что ПЭП имеют форму треугольника.

Развитием этого подхода можно считать метод кодирования [15, 16]. В этом случае импульсы подсветки и экспозиции также имеют прямоугольную форму. Однако в пределах кадра профиль экспозиции в приемном блоке содержит несколько серий прямоугольных импульсов разной длительности (включенное состояние), т. е. содержащих разное число так называемых сигнальных бин, разделенных прямоугольными интервалами времени с разным числом нулевых бин (выключенное состояние). Такой подход позволяет увеличить диапазон дистанции, в пределах которого определяется расстояние до объектов. Указанные методы определения расстояния применимы для прямоугольной формы обоих импульсов. Для исключения влияния формы импульса подсветки предложен метод модуляции усиления приемного блока как по линейному [17], так и по экспоненциальному закону [18].

Рассмотренные высокоточные и хорошо зарекомендовавшие себя методы определения расстояний до объектов и построения трехмерных изображений при втором способе наблюдения справедливы для прямоугольной формы импульсов. Предложенные методы модуляции усиления, хотя и не требуют прямоугольной формы импульса подсветки, несколько усложняют техническую реализацию принципа видения. Поэтому необходимо выяснить пределы применимости известных методов и разработать сравнительно простые методы в случае произвольной формы импульсов подсветки.

В настоящей работе исследованы закономерности формирования принимаемого сигнала в пределах зоны видимости (ПЭП) для второго способа наблюдения и возможности определения характерных расстояний при форме импульса подсветки, отличной от прямоугольной. Импульс регистрации (строб-импульс) предполагается прямоугольным, что близко к реализуемым в большинстве экспериментов ситуациям. Для простоты принимается, что угловые поля зрения приемника и подсветки совпадают, т. е. так называемый геометрический фактор равен единице.

Результаты расчетов и их обсуждение. Из приведенных в [14, 19] экспериментальных форм импульсов подсветки можно сделать вывод, что в простейших случаях их временные зависимости моделируются треугольником или трапецией. Форму импульсов подсветки трапециевидной формы задаем с помощью параметров α и β , равных отношению длительностей переднего возрастающего (фронта) и заднего уменьшающегося (спада) участков к длительности основания импульса подсветки. В этом случае величина $1 - (\alpha + \beta)$ определяет длительность верхней платообразной стороны тра-

пещи. Если $\alpha = \beta$, то импульсы называем симметричными, при $\alpha \neq \beta$ — асимметричными. Для импульсов треугольной формы достаточно ввести один параметр γ , равный отношению длительности фронта к длительности основания треугольника. При этом длительность спада $1 - \gamma$.

Результаты расчетов ПЭП регистрируемого сигнала E , т. е. зависимости его величины от расстояния до объекта S , представлены на рис. 1. При этом форма импульса подсветки моделировалась прямоугольником, левосторонним или правосторонним прямоугольным треугольником, левосторонней или правосторонней прямоугольной трапецией и реальной экспериментальной формой [14, 19]. Для наглядности расстояние задержки $S_d = ct_d/2 = 80$ м отмечено вертикальной линией. Кривые 1, 2 и 3 отображают влияние изменения соотношения длительностей τ_p и τ_g на ПЭП $\tau_p = \tau_g/3$, $\tau_p = \tau_g$ и $\tau_p = 3\tau_g$ соответственно. На рис. 1 кривые нормированы на одну и ту же величину.

На примере кривой 3 рис. 1, *a* (импульсы подсветки и экспозиции имеют прямоугольную форму) поясним, что обычно точку $S = 53$ м называют начальной точкой ($S_{\text{нач}}$) зоны видимости, $S = 89$ м — конечной ($S_{\text{кон}}$) [20]. Расстояния $S_{\text{нач-100\%}} = 62$ м и $S_{\text{кон-100\%}} = 80$ м — начальное (ближнее) и конечное (дальнее), в пределах которых принимаемый сигнал регистрируется в течение 100 % интервала времени открытого состояния ЭОП τ_g (при $\tau_p > \tau_g$) либо в течение 100 % длительности импульса подсветки τ_p (при $\tau_p < \tau_g$).

В соответствии с [20] для прямоугольных импульсов подсветки и стробирования $S_{\text{кон}} = S_d + c\tau_g/2$, где c — скорость света. Поскольку S_d и τ_g являются фиксированными величинами, вычисленное по формуле расстояние $S_{\text{кон}} = 89$ м соответствует значениям, приведенным на рис. 1. Согласно [20], расстояние $S_{\text{нач}} = S_d - c\tau_p/2$ является функцией τ_p . Вычисленные значения $S_{\text{нач}} = 77$ м (кривые 1), 71 м (кривые 2) и 53 м (кривые 3) совпадают с приведенными на рис. 1. Таким образом, расстояния $S_{\text{нач}}$ и $S_{\text{кон}}$ не зависят от формы импульса подсветки, поскольку определяются физическим принципом работы АИСВ. В соответствии с [20] для прямоугольных импульсов подсветки для промежуточных характерных расстояний $S_{\text{макс}} = S_d$ (при $\tau_p = \tau_g$) и $S_{\text{макс}} = S_{\text{нач-100\%}} = S_d$ (при $\tau_p < \tau_g$), где $S_{\text{макс}}$ — расстояние, соответствующее максимуму ПЭП. Это подтверждается рис. 1, *a*. Дополнительный анализ показывает, что это условие выполняется и для рис. 2 и 3 (кривые 1 и 2). Кроме того, согласно [20], для кривых 1 ($\tau_p < \tau_g$) характерное расстояние $S_{\text{кон-100\%}} = S_d + c(\tau_g - \tau_p)/2 = 86$ м, что согласуется с рис. 1. Из анализа кривых 2 (рис. 1) можно сделать вывод, что при $\tau_p = \tau_g$ значение $S_{\text{макс}} = S_d$ не зависит от формы

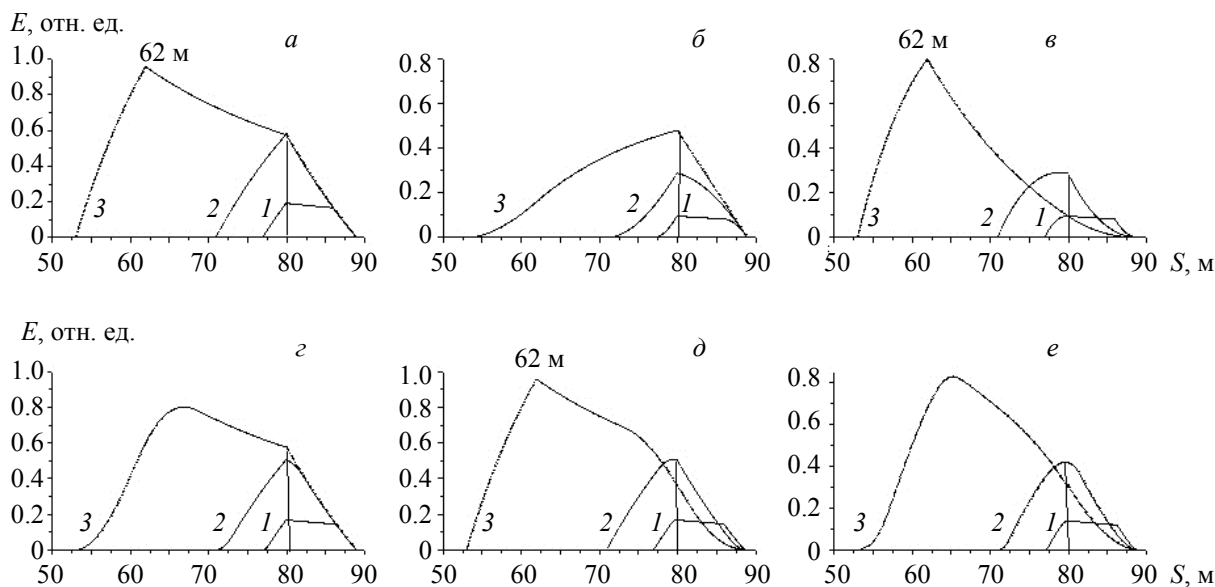


Рис. 1. Пространственно-энергетические профили регистрируемого сигнала E при различных формах импульса подсветки: $S_d = 80$ м; $\tau_g = 60$ нс; $\tau_p = 20$ (1), 60 (2) и 180 нс (3); форма импульса подсветки: *a* — прямоугольная ($\alpha = \beta = 0$), *б* — левосторонний прямоугольный треугольник ($\gamma = 0$), *в* — правосторонний прямоугольный треугольник ($\gamma = 1$), *г* — левосторонняя прямоугольная трапеция ($\alpha = 0, \beta = 0.25$), *д* — правосторонняя прямоугольная трапеция ($\alpha = 0.25, \beta = 0$), *e* — реальная экспериментальная форма (приблизительно соответствует трапеции с $\alpha = 0.63$ и $\beta = 0.25$)

импульса подсветки. Аналогично при $\tau_p < \tau_g$ (кривые 1) промежуточные характерные расстояния $S_{\text{нач-100\%}} = S_d$ и $S_{\text{кон-100\%}}$ также не зависят от формы импульса подсветки. Таким образом, при $\tau_p = \tau_g$ и $\tau_p < \tau_g$ все характерные расстояния не зависят от формы импульса подсветки (следовательно, и основные закономерности формирования ПЭП). Данный результат совпадает с аналогичным по смыслу выводом для первого способа наблюдения [21]. Это можно объяснить тем, что приемным блоком в точке $S_{\text{макс}}$ (при $\tau_p = \tau_g$) или в пределах дистанции $S_{\text{нач-100\%}} - S_{\text{кон-100\%}}$ ($\tau_p < \tau_g$) регистрируется 100 % энергии (т. е. импульс целиком) эхо-сигнала подсветки. По этой причине не имеет значения, каким образом распределена энергия по времени в пределах импульса подсветки. Поэтому для определения характерных расстояний, расстояний до объектов и параметров системы можно использовать подходы, полученные ранее для прямоугольных импульсов подсветки (см., например, [20]). В то же время видно, что в зависимости от формы импульса подсветки отдельные участки ПЭП могут принимать форму выпуклых или вогнутых кривых. Из сравнения рис. 1, б и в, г и д видно, что в точке $S_{\text{макс}}$ реализуются разные величины регистрируемого сигнала. Как и следует ожидать, меньшим $S_{\text{макс}}$ соответствуют большие значения сигнала. Кроме того, форма и положение максимума для кривых 3 зависят от формы импульса подсветки. Это объясняется тем, что при $\tau_p > \tau_g$ за время экспозиции τ_g обычно регистрируются разные части импульса подсветки, определяемые расстоянием S до соответствующего объекта. По этой причине важно распределение энергии в пределах импульса, которое отражается на ПЭП регистрируемого сигнала.

Аналитические выражения для определения расстояния $S_{\text{макс}}$ при $\tau_p > \tau_g$. В ряде случаев практический интерес представляет определение расстояния $S_{\text{макс}}$ (рис. 1, кривые 3), соответствующего максимуму ПЭП, с использованием известных параметров АИСВ. Рассмотрим пространственно-временную схему (рис. 2), которая ранее применялась для нахождения характерных расстояний [19, 20]. На рис. 2, а и б представлен простейший случай, когда импульс подсветки моделируется равнобедренным треугольником ($\gamma = 0.5$) и выполняются соотношения $\tau_p = 2\tau_g$ и $\tau_p = 3\tau_g$. Линия S_0 изображает поверхности излучающего и приемного блоков АИСВ. Линия S_g удалена от нее на расстояние $S_g = c\tau_g$. Расстояние задержки $S_d = ct_d/2$ помечено линией S_d . Треугольниками изображены импульсы подсветки. Стрелка указывает, что после отражения от объекта, находящегося на расстоянии $S_{\text{макс}}$, импульс подсветки возвращается к приемному блоку. На рис. 2 отражено расположение импульса подсветки в момент включения строб-импульса (приемного блока). Видно, что за время экспозиции τ_g приемным блоком регистрируется энергия, пропорциональная площади, которая “вырезается” из треугольника линиями S_0 и S_g . При этом импульсы подсветки расположены относительно указанных линий таким образом, что регистрируется максимально возможная энергия $E_{\text{макс}}$, которая соответствует максимумам кривых 3 на рис. 1 для случая $\tau_p > \tau_g$. Аналогично развитому в [19, 20] подходу с учетом геометрических соотношений для пути, прошедшего передним фронтом импульса подсветки (рис. 2, а; $\tau_p = 2\tau_g$), получаем $S_{\text{макс}} + S_{\text{макс}} + S_a = ct_d$. Из рис. 2, а следует $S_a = (1/4)c\tau_p$. Кроме того, для общности при выводе аналитических выражений в соответствии с [19, 20] примем $t_d = t_{d0} + t_{dx}$, где t_{d0} — временная задержка, обусловленная управляющими импульсами, t_{dx} — дополнительная аппаратурная задержка, непосредственно трудно измеряемая, вносящая определенный вклад в вычисляемое расстояние. Обычно расстояние задержки, которое отображается на дисплее АИСВ, вычисляется как $S_d = ct_{d0}/2$. С учетом пояснений можно определить расстояние $S_{\text{макс}}$:

$$S_{\text{макс}} = S_d - (1/8)c\tau_p + (1/2)ct_{dx}. \quad (1)$$

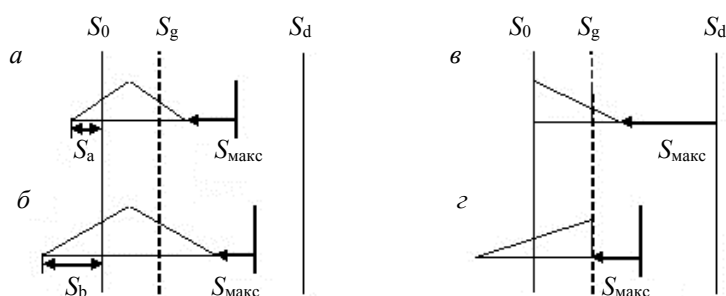


Рис. 2. Схемы, поясняющие образование расстояний $S_{\text{макс}}$ при разных условиях: $\tau_p = 2\tau_g$ (а), $\tau_p = 3\tau_g$ (б), $\tau_p > \tau_g$ (в, з); $\gamma = 0.5$ (а, б), 0 (в) и 1 (з)

Из рис. 2, б с учетом выражения $S_b = (1/4)c\tau_p$ аналогично получим

$$S_{\max} = S_d - (1/6)c\tau_p + (1/2)ct_{dx}. \quad (2)$$

В табл. 1 приведены выражения, аналогичные соотношениям (1) и (2), для определения расстояния S_{\max} для некоторых простейших случаев импульсов подсветки треугольной формы, полученные с использованием данного подхода. Выражения для S_{\max} в случае импульсов подсветки трапециевидной формы представлены в табл. 2. На основе выражений табл. 1 вычислены расстояния S_{\max} для асимметричных импульсов подсветки треугольной формы (рис. 1, б и в, кривые 3). Сравнение показывает, что вычисленные значения совпадают с приведенными на рис. 1. Аналогичное сопоставление результатов выполнено для асимметричных трапециевидных импульсов (рис. 1, з и д, кривые 3, табл. 2). Результаты для рис. 1, д совпадают. Для рис. 1, з получаем $S_{\max}^{\text{гр}} = 67$ м, а на основании табл. 2 вычисляем $S_{\max}^{\text{гр}} = 68.7$ м, т. е. относительная погрешность $\varepsilon = (68.7 - 67)/67 = 2.5\%$.

Т а б л и ц а 1. Зависимость расстояния S_{\max} , соответствующего максимуму ПЭП, от параметров системы для случая, когда импульс подсветки имеет треугольную форму

Параметр	$\tau_p = 2\tau_g$		
	$\gamma = 0$	$\gamma = 0.5$	$\gamma = 1$
S_{\max}	$S_d + ct_{dx}/2$	$S_d - (1/8)c\tau_p + ct_{dx}/2$	$S_d - (1/4)c\tau_p + ct_{dx}/2$
	$\tau_p = 3\tau_g$		
	$\gamma = 0$	$\gamma = 0.5$	$\gamma = 1$
S_{\max}	$S_d + ct_{dx}/2$	$S_d - (1/6)c\tau_p + ct_{dx}/2$	$S_d - (1/3)c\tau_p + ct_{dx}/2$

Для объяснения причины появления погрешности используем рис. 3, на котором приведены зависимости регистрируемого сигнала E и так называемой свертки R . Выражение для E можно записать в виде [22]:

$$E = E_0 E_{\text{пр}} R, \quad (3)$$

где E_0 — постоянный множитель, не зависящий от расстояния S : $E_{\text{пр}} = \exp(-2\sigma S)/S^2$ — “пространственный” множитель; $R = \int P(t - 2S/c)G(t - t_d)dt$ — множитель-свертка двух импульсных сигналов $P(t)$ и $G(t)$, сдвинутых по времени, обусловлен физическим принципом действия АИСВ; σ — показатель ослабления излучения в атмосфере; $P(t)$ — мощность излучения подсветки; $G(t)$ — функция, описывающая временную зависимость чувствительности приемного блока (строб-импульса).

В [23] установлено, что в зависимости от соотношения расстояний S_d , l_p и $l_p + l_g$ ($l_p = c\tau_p/2$; $l_g = c\tau_g/2$) для прямоугольных импульсов подсветки можно выделить три интервала дистанций, в пределах которых поведение S_{\max} подчиняется разным закономерностям. Частично это демонстрирует рис. 3 для импульсов, форма которых отличается от прямоугольной. Если $m = S_d/(l_p + l_g) < 1$ (рис. 3, а; $m = 0.83$), то максимум $S_{\max} = 15$ м и расстояние $S_{\max}(R) = 30$ м, соответствующее максимуму функции R , сильно различаются. При увеличении m (рис. 3, б; $m = 1.1$) максимумы сближаются: $S_{\max} = 35$ м и $S_{\max}(R) = 40$ м. При достижении $m = 2.2$ (рис. 3, в) и для всех $m > 2.2$ (рис. 3, з; $m = 6.7$) указанные максимумы совпадают. В связи с этим приведенные в табл. 1 и 2 расстояния S_{\max} , основанные на использовании представлений рис. 2 (справедливых для описания поведения $R(S)$), верны для того интервала дистанций S_d , где выполняется условие $S_{\max} = S_{\max}(R)$ (при квазитрапециевидной форме $R(S)$, когда $\tau_p = \tau_g$). В случае квазитрапециевидной формы $R(S)$ (когда $\tau_p \neq \tau_g$) это условие записывается в виде $S_{\max} = S_{\max}(R_{\text{нач-100\%}})$, где $S_{\max}(R_{\text{нач-100\%}})$ — расстояние максимума функции $R(S)$, которое совпадает с характерным расстоянием $R_{\text{нач-100\%}}$ (по аналогии с $E_{\text{нач-100\%}}$). Границы выполнения (невыполнения) данного равенства зависят от “степени влияния” пространственного множителя $E_{\text{пр}}$ на множитель-свертку R . Отметим, что множитель $E_{\text{пр}}$ сравнительно сильно изменяется на относительно малых дистанциях. Так, при нормальной видимости $E_{\text{пр}} = 2.2 \cdot 10^{-6}$ ($S = 15$ м), $2.5 \cdot 10^{-7}$ (45 м), $1.2 \cdot 10^{-7}$ (65 м) и $6.9 \cdot 10^{-8}$ (85 м). Кроме того, чем больше длина зоны видимости, тем больше его проявление в пределах зоны. Результаты расчетов показывают, что для случаев, когда $S_{\max}^{\text{гр}}$ и $S_{\max}^{\text{т}}$ совпадают, выполняется условие $S_{\max} = S_{\max}(R)$ (или $S_{\max} = S_{\max}(R_{\text{нач-100\%}})$). Последнее условие при $S_d = 80$ м выполняется приближенно для рис. 1, з и е. Так, для рис. 1, з $\varepsilon = (R_{\max} - S_{\max})/R_{\max} = (68.3 - 67)/68.3 = 0.02$. При увеличении S_d значение ε стремится к нулю.

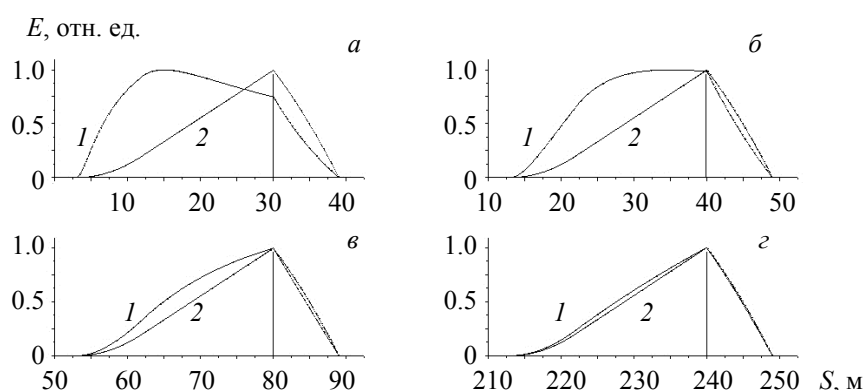


Рис. 3. Зависимости регистрируемого сигнала E и множителя-свертки R от расстояния S при различных дистанциях задержек для треугольной формы импульса подсветки ($\gamma = 0$): $S_d = 30$ (а), 40 (б), 80 (в) и 240 м (г)

Таким образом, использовать выражения табл. 1 и 2 для определения расстояний S_{\max} (следовательно, и до объектов, находящихся в этой точке) можно, начиная с дистанций S_d , когда выполняется условие $S_{\max} = S_{\max}(R)$ (или $S_{\max} = S_{\max}(R_{\text{нач-100\%}})$). Выполнение указанного условия также необходимо для применимости полученных в [20] аналитических выражений для промежуточных характерных расстояний. Начало выполнения указанного условия можно определить экспериментально путем сравнения S_{\max}^T с соответствующим значением, полученным, например, при измерении с помощью рулетки (сопоставляя с изображением, которое получено с помощью АИСВ). Начиная с данной дистанции S_d можно ввести, аналогично [19, 21], калибровочную постоянную $k = S_d - S_{\max}$, которая не зависит от S . Зная установленное на пульте значение S_d , при известном k можно вычислить расстояние S_{\max} . Наличие связи $k = S_d - S_{\max}$ для второго способа наблюдения отмечено в [23]. Кроме того, согласно рис. 1, б, возможна реализация случая $S_{\max} = S_d$ (если $t_{dx} = 0$). С помощью рис. 2, в действительно получаем $S_{\max} = S_d$. Этот случай предпочтителен, поскольку не требуется находить калибровочную постоянную. Из рис. 1, а, в и д следует $S_{\max} = 62$ м. Для объяснения совпадения расстояний обратимся к рис. 2, г, который соответствует треугольному импульсу с $\gamma = 1$. Используя описанный ранее подход, получаем $S_{\max} = S_d - c\tau_p/2 + c\tau_g/2 = 62$ м. Справедливость этого результата для рис. 1, а и д объясняется так. Для реализации значения S_{\max} в данном случае хвосту импульса, совпадающему с линией S_g , должна соответствовать либо максимальная мощность, либо при движении в направлении головы импульса мощность может не изменяться (прямоугольный импульс, рис. 1, а), либо после некоторого платообразного участка может уменьшаться (трапециевидный импульс, рис. 1, д).

Т а б л и ц а 2. Зависимость расстояния S_{\max} , соответствующего максимуму ПЭП для случая, когда импульс подсветки имеет трапециевидную форму

Параметр	$\tau_p = 2\tau_g$	
S_{\max}	$\alpha = \beta = 0.25$	
	$S_d - (1/8)c\tau_p + ct_{dx}/2$	
S_{\max}	$\alpha = 0, \beta = 0.25$	$\alpha = 0.25, \beta = 0$
	$S_d - (1/8)c\tau_p + ct_{dx}/2$	$S_d - (1/4)c\tau_p + ct_{dx}/2$
S_{\max}	$\tau_p = 3\tau_g, \alpha = \beta = 0.25$	
	$S_d - (5/24)c\tau_p + ct_{dx}/2$	
S_{\max}	$\tau_p = 3\tau_g$	
	$\alpha = 0, \beta = 0.25$	$\alpha = 0.25, \beta = 0$
	$S_d - (5/24)c\tau_p + ct_{dx}/2$	$S_d - (1/3)c\tau_p + ct_{dx}/2$

Заключение. С помощью численного моделирования изучены закономерности формирования пространственно-энергетического профиля регистрируемого сигнала при различных формах импульса подсветки, отличной от прямоугольной, и разных соотношениях между длительностями импульсов подсветки τ_p и регистрации τ_g . Рассматривается второй способ наблюдения, когда объект наблю-

дается в пределах зоны видимости на разных дистанциях при фиксированном расстоянии задержки. Установлено, что при $\tau_p < \tau_g$ и $\tau_p = \tau_g$ характерные расстояния зоны видимости не зависят от формы импульса подсветки. Это объясняется тем, что существует интервал дистанции или характерное расстояние, где приемным блоком регистрируется 100 % энергии (т. е. импульс целиком) эхо-сигнала подсветки. По этой причине не имеет значения, каким образом распределена энергия по времени в пределах импульса. При указанном соотношении длительностей для определений характерных расстояний можно использовать полученные ранее выражения для импульсов подсветки прямоугольной формы. При $\tau_p > \tau_g$ пространственно-энергетический профиль для рассмотренных случаев представляется, как правило, выпуклую асимметричную кривую с максимумом в точке S_{\max} . Для простейших форм импульсов подсветки, которые моделировались в форме асимметричных треугольников или трапеций, получены аналитические выражения, которые позволяют определить S_{\max} (и дистанцию до объекта в этой точке) по известным расстоянию задержки и длительности импульса подсветки той или иной формы. Для данного соотношения длительностей предложен метод калибровочной постоянной, который также позволяет определять расстояние S_{\max} для реальной формы импульса подсветки.

- [1] **И. Л. Гейхман, В. Г. Волков.** Основы улучшения видимости в сложных условиях, Москва, ООО “Недра–Бизнес-центр” (1999)
- [2] **В. Г. Волков, Б. А. Случак.** Контент, **15**, № 3 (2016) 62—70
- [3] **В. Г. Волков.** Фотоника, № 4 (2007) 24—28
- [4] **В. Г. Волков.** Системы управления, связи и безопасности, № 2 (2016) 142—180
- [5] **Seung-Kyu Park, In-Young Choi, Sung-Hoon Baik, Kyung-Min Jeong.** Opt. Appl., **47**, N 4 (2017) 533—543
- [6] **X. Wang, Y. Li, Y. Zhou.** Opt. Express, **23** (2015) 7820—7831
- [7] **M. Laurenzis, F. Christnacher.** Adv. Opt. Technol., **2**, N 5-6 (2013) 397—405
- [8] **S. Y. Chua, X. Wang, N. Guo, C. S. Tan, T. Y. Chai, G. L. Seet.** J. Eur. Opt. Soc. Rapid, **11** (2016) 16015
- [9] **B. Goehler, P. Lutzmann.** Opt. Eng., **56**, N 3 (2017) 031203
- [10] **D. V. Alant’ev, A. A. Golitsyn, A. V. Golitsyn, N. A. Seifi.** J. Opt. Technol., **85**, N 6 (2018) 355—358
- [11] **A. A. Golitsyn, N. A. Seyfi.** Appl. Phys., N 1 (2018) 78—83
- [12] **X. Wang, Y. Li, J. Zhou.** Appl. Opt., **52**, N 30 (2013) 7399—7406
- [13] **M. Laurenzis, F. Christnacher, D. Monnin.** Opt. Lett., **32**, N 21 (2007) 3146—3148
- [14] **B. F. Kuntsevich, D. V. Shabrov.** Proc. SPIE, **11159** (2019) 1115910
- [15] **M. Laurenzis, E. Bacher.** Appl. Opt., **50** (2011) 3824—3828
- [16] **X. Wang, Y. Cao, W. Cui, X. Liu, S. Fan, Y. Zhao, Y. Li.** Proc. SPIE, **9260** (2014) 92604L
- [17] **X. Zhang, H. Yan, Y. Jiang.** Opt. Lett., **33**, N 11 (2008) 1219—1221
- [18] **C. Jin, X. Sun, Y. Zhao, Y. Zhang, L. Liu.** Opt. Lett., **34**, N 22 (2009) 3550—3552
- [19] **В. А. Горобец, Б. Ф. Кунцевич, Д. В. Шабров.** Журн. прикл. спектр., **84** (2017) 794—802 [V. A. Gorobets, B. F. Kuntsevich, D. V. Shabrov. J. Appl. Spectr., **84** (2017) 850—858]
- [20] **В. А. Горобец, В. В. Кабанов, В. П. Кабашников, Б. Ф. Кунцевич, Н. С. Метельская, Д. В. Шабров.** Журн. прикл. спектр., **82** (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]
- [21] **V. Kabashnikov, B. Kuntsevich.** Appl. Opt., **56**, N 33 (2017) 8378—8384
- [22] **Wang Xinwei, Zhou Yan, Liu Yuliang.** Chin. Opt. Lett., **10** (2012) 101101
- [23] **Б. Ф. Кунцевич, В. П. Кабашников.** Журн. прикл. спектр., **88** (2021) 137—143 [B. F. Kuntsevich, V. P. Kabashnikov. J. Appl. Spectr., **88** (2021) 1112—1116]