

ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СИГНАЛОВ АКТИВНО-ИМПУЛЬСНЫХ СИСТЕМ ВИДЕНИЯ ОТ ОБЪЕКТОВ НА МАЛЫХ РАССТОЯНИЯХ

В. П. Кабашников*, Б. Ф. Кунцевич

УДК 621.384.3:621.391

ГНПО “Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника”,
220072, Минск, Беларусь; e-mail: v.kabashnikov@dragon.bas-net.by

(Поступила 14 сентября 2020)

Изучены пространственно-энергетические профили регистрируемой энергии отраженных импульсов прямоугольной и реальной форм. Величины максимального сигнала, положение максимума и размер области наилучшей видимости исследованы в зависимости от дистанции задержки при разных соотношениях между длительностями импульса и временами регистрации сигнала.

Ключевые слова: *активно-импульсная система видения, пространственно-энергетический профиль, дистанция задержки, положение максимума сигнала.*

The spatial-energy profiles of the recorded energy of reflected rectangular and real-form pulses are studied. The values of the maximum signal, the position of the maximum and the size of the best visibility area were studied as a function of the delay distance at different ratios between the pulse durations and the signal registration times.

Keywords: *active-pulse vision system, spatial-energy profile, delay distance, signal maximum position.*

Введение. Действие активно-импульсных систем видения (АИСВ) основано на освещении объектов импульсным излучением при синхронизированной с импульсом регистрации (стробировании) отраженного сигнала спустя некоторое время задержки [1, 2]. Такие системы позволяют видеть объекты в пределах относительно узкого пространственного слоя (зоны видимости), расположенного на расстоянии, определяемом временем задержки, и имеющего глубину, зависящую от длительностей импульса и регистрации. Первоначально АИСВ предназначались для наблюдения объектов в условиях плохой видимости в рассеивающих средах (туман, сильный снегопад, гидрозоли и т. д.) [3—5]. Теоретические основы переноса изображения в рассеивающих средах изложены в работах [6—8]. Ряд практических аспектов по разработке и применению АИСВ содержатся в [2, 9—11]. Помимо детектирования и распознавания объектов при плохой видимости, АИСВ в настоящее время также применяются для оценки расстояний и получения 3D-изображений [12—17]. При плохой видимости или недостаточной подсветке фактически можно наблюдать лишь объекты, находящиеся вблизи АИСВ. Однако пространственно-энергетический профиль (ПЭП) сигналов АИСВ, т. е. зависимость регистрируемой энергии отраженного импульса от расстояния до объекта при фиксированном времени задержки, на относительно малых расстояниях ранее измерялся лишь в работе [18]. Из ее результатов можно сделать вывод, что указанное распределение представляет собой асимметричную кривую с резким максимумом, смещенным в сторону меньших расстояний. Экспериментальные и численные исследования ПЭП сигналов АИСВ при дистанциях задержки, сопоставимых с длиной зоны видимости, выполнены также в [19], где получено хорошее согласие расчетов с экспериментом, рассчитаны типичные ПЭП для импульсов реальной формы при различных дистанциях задержки. Настоящая работа является развитием и обобщением результатов [19].

SPATIAL DISTRIBUTION OF ACTIVE-PULSE VISION SYSTEM SIGNALS FROM OBJECTS AT SHORT DISTANCES

V. P. Kabashnikov*, B. F. Kuntsevich (SSPA "Optics, Optoelectronics, and Laser Technology", Minsk, 220072, Belarus; e-mail: v.kabashnikov@dragon.bas-net.by)

При наблюдении сцены с помощью АИСВ интерес представляют в первую очередь участки зоны видимости, дающие сигнал, близкий к максимальному. Цель настоящей работы — связать параметры этих участков (их положение, размер, величину сигнала в максимуме) с длительностью импульса, длительностью регистрации сигнала, а также с временем задержки регистрации сигнала, что позволит предложить оптимальные режимы работы АИСВ. Рассмотрим случай прямоугольных импульсов в не ослабляющей свет среде, что дает возможность получить некоторые аналитические оценки, и случай импульсов реальной формы. Покажем, что аналитические результаты, полученные для прямоугольных импульсов, качественно применимы и для случая импульсов реальной формы.

Регистрируемая доля энергии отраженного импульса. Пусть система видения освещает сцену с совокупностью объектов световыми импульсами длительностью τ_p . По истечении времени задержки t_d , которое отсчитывается от момента выхода переднего фронта освещающего импульса, отраженный от объектов импульс регистрируется в течение времени τ_g , сопоставимого с τ_p . Тогда ПЭП сигнала АИСВ, т. е. зависимость регистрируемой энергии отраженного импульса от расстояния S до объекта при фиксированном времени задержки, можно представить в виде [1]:

$$E(S, S_d) = \kappa S^{-2} \exp(-2\alpha S) / R(S - S_d), \quad (1)$$

где κ — константа, учитывающая поле зрения осветителя, коэффициент отражения цели, энергию импульса и характеристики приемника; α — коэффициент экстинкции света; $S_d = c t_d / 2$ — дистанция задержки; c — скорость света; R — свертка по времени t относительной чувствительности фотоприемника $Q(t)$ и мощности $f(t)$ освещающего импульса, отнесенной к его энергии:

$$R(x) = \int Q(t + 2x/c) f(t) dt, \quad (2)$$

$$x = S - S_d. \quad (3)$$

Область интегрирования в (2) включает в себя все времена, где функция $f(t) \neq 0$. Рассмотрим прямоугольную зависимость чувствительности фотоприемника от времени $Q(t)$, принимающую значения 0 и 1. При указанных условиях R представляет собой регистрируемую долю энергии (РДЭ) отраженного импульса. Как следует из (2) и (3), при возрастании дистанции задержки РДЭ смещается, не изменяя формы, в сторону больших S . В выражении (1) неявно предполагается, что поле зрения приемника излучения совпадает с угловым пространством источника подсветки.

РДЭ имеет четыре характерные точки, обусловленные совпадением времен прихода переднего ($2S/c$) или заднего ($2S/c + \tau_p$) фронтов импульса с моментами открытия (t_d) или закрытия ($t_d + \tau_g$) затвора. Эти точки соответствуют отражению импульса от объектов, находящихся на четырех характерных расстояниях. Два из них ограничивают зону видимости:

$$S_n = S_d - l_p, \quad S_f = S_d + l_g, \quad (4)$$

где $l_p = c\tau_p/2$, $l_g = c\tau_g/2$.

Два других характерных расстояния S_d и $S_i = S_d + l_g - l_p$ находятся между S_n и S_f . Рассмотрим не ослабляющую свет среду, т. е. $\alpha = 0$. Для аналитических оценок используем модель прямоугольных импульсов. Численные результаты получены для формы импульса, близкой к реальной.

Модель прямоугольных импульсов. В случае прямоугольных импульсов РДЭ имеет форму трапеции при $l_p \neq l_g$ или треугольника при $l_p = l_g$:

$$R(x) = (l_p + x) / l_p \quad \text{при} \quad -l_p \leq x \leq l - l_p, \quad (5)$$

$$R(x) = l / l_p \quad \text{при} \quad l - l_p \leq x \leq \max[0, (l_g - l_p)], \quad (6)$$

$$R(x) = (l_g - x) / l_p \quad \text{при} \quad \max[0, (l_g - l_p)] \leq x \leq l_g, \quad (7)$$

где $l = \min(l_g, l_p)$.

В случае прямоугольных импульсов РДЭ линейно возрастает на участке (5), является константой на участке (6) (либо этот участок вырождается в точку при $l_p = l_g$) и линейно спадает на участке (7). ПЭП сигналов АИСВ $E(S, S_d)$ может иметь максимум по S только на возрастающем участке РДЭ (5) или на стыке возрастающего участка (5) и последующего участка (6) (или (7) при $l_p = l_g$), так как на участках (6) и (7) энергия $E(S, S_d)$ спадает с ростом S .

Рассмотрим функцию $E(S, S_d)$ на возрастающем участке РДЭ (5). Примеры возрастающих участков РДЭ (5) для разных дистанций задержки представлены на рис. 1. Введем переменную $z = (l_p + x)/l$, которая на возрастающем участке может изменяться от 0 до 1. Тогда $S = lz - l_p + S_d$, и функцию $E(S, S_d)$ при $\alpha = 0$ можно записать в виде

$$E(z, S_d) = \kappa(l/l_p)z(lz - l_p + S_d)^{-2}. \tag{8}$$

Производная от (8) по z имеет вид:

$$\partial E(z, S_d)/\partial z = -S^{-3}\kappa(l/l_p)\{lz - (S_d - l_p)\}. \tag{9}$$

Рассмотрим случай дистанций задержки меньше полудлины импульса ($S_d < l_p$). Указанному условию удовлетворяют возрастающие участки РДЭ (5), находящиеся между отрезками 1 и 2 (рис. 1). К ним можно отнести, например, возрастающие участки РДЭ *a* и *б*. При $S_d < l_p - l$ возрастающие участки РДЭ находятся в области отрицательных расстояний $S < 0$. В область $S > 0$ попадают лишь невозрастающие участки РДЭ, заведомо не дающие максимума регистрируемого сигнала и приводящие к спаду сигнала с расстоянием. Возрастающий участок РДЭ (5) может оказаться в области $S > 0$ только при $l_p - l < S_d < l_p$, что соответствует величине z , изменяющейся от $(l_p - S_d)/l$ до единицы. Однако в этом случае производная (9) отрицательна, как и производные по расстоянию S от других участков ПЭП, где РДЭ описывается формулами (6) и (7). Поэтому при дистанциях задержки, удовлетворяющих условию $0 < S_d < l_p$, регистрируемая энергия отраженного импульса (8) в области перед прибором спадает с расстоянием S . При этом наибольшая регистрируемая энергия отраженного импульса реализуется при отражении от объектов, находящихся непосредственно перед прибором. Из (1) видно, что ее величина стремится к бесконечности при $S \rightarrow 0$. Такой результат является следствием предположения о совпадении поля зрения приемника излучения с угловым пространством источника подсветки.

Рассмотрим случай $S_d \geq l_p$. На рис. 1 возможные положения возрастающих участков РДЭ (5) находятся правее отрезка 2. Приравнивая к нулю производную (9), получаем положение локального максимума z_m :

$$z_m = (S_d - l_p)/l. \tag{10}$$

Из выражения (10) следует, что при $S_d = l_p$ максимум регистрируемой энергии отраженного импульса находится при $S = 0$ в начале возрастающего участка РДЭ (5) в точке $z_m = 0$. С ростом дистанции задержки z_m возрастает, т. е. максимум перемещается по возрастающему участку РДЭ в сторону увеличения РДЭ, при этом РДЭ как целое смещается в сторону больших расстояний S . Величина z_m достигает единицы в конце возрастающего участка РДЭ при $S_d = l_p + l$. Последний представлен на рис. 1 отрезком 3. При $S_d > l_p + l$ положение максимума уже не определяется из равенства нулю производной (9). Максимум возникает в конце возрастающего участка при $z_m = 1$ на стыке возрастающего и последующего (невозрастающего) участков РДЭ. Резюмируя изложенное выше относительно положения максимума регистрируемой энергии отраженного импульса при $S_d \geq l_p$, расстояние S_m , на котором находится максимум, запишем как

$$S_m = l\min(z_m, 1) + S_d - l_p, \tag{11}$$

где z_m — величина, определяемая уравнением (10).

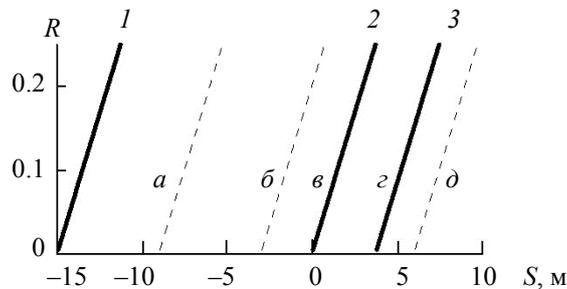


Рис. 1. Возрастающие участки РДЭ (5) при $\tau_p = 100$ нс ($l_p = 15$ м) и $\tau_g = 25$ ($l_g = 3.75$ м) для граничных дистанций задержки (жирные линии): $S_d = 0$ (1), 15 (2) и 18.75 (3), а также для промежуточных дистанций задержки (штриховые), используемых для расчета ПЭП: $S_d = 6$ (а), 12 (б), 15 (в), 18.75 (з) и 21 (д)

Таким образом, в случае прямоугольных импульсов существуют три интервала дистанций задержки, где положение максимума регистрируемой энергии отраженного импульса подчиняется разным закономерностям. На первом интервале дистанции задержки удовлетворяют условию $0 < S_d < l_p$. На рис. 1 возможные положения возрастающих участков РДЭ (5) находятся между отрезками 1 и 2. Регистрируемая энергия отраженного импульса (8) в области перед прибором, т. е. при $S > 0$, спадает с расстоянием. Наибольший отраженный регистрируемый сигнал имеет место от объектов, расположенных непосредственно перед прибором при любой из допустимых дистанций задержки.

Второй интервал характеризуется дистанциями задержки, удовлетворяющими условию $l_p \leq S_d \leq l_p + l$. На рис. 1 возможные положения возрастающих участков РДЭ (5) должны находиться между отрезками 2 и 3. При возрастании дистанций задержки от l_p до $l_p + l$ максимум смещается от начала к концу возрастающего участка РДЭ при одновременном смещении самой РДЭ в сторону больших S . Как видно из (8), (11), в указанном интервале дистанций задержки положение максимума $S_m = 2(S_d - l_p)$ и максимальная энергия отраженного импульса $E(z_m, S_d) = \kappa[4l_p(S_d - l_p)]^{-1}$ не зависят от длительности экспозиции.

На третьем интервале, где $S_d > l_p + l$, возможные положения возрастающих участков РДЭ (5) находятся правее отрезка 3 на рис. 1. Максимум энергии отраженного импульса возникает на стыке возрастающего и последующего участков РДЭ. Его положение определяется формулой $S_m = S_d - (l_p - l)$, максимальная энергия $E(1, S_d) = \kappa(l/l_p)(l - l_p + S_d)^{-2}$. При длительностях экспозиции, равных или превосходящих длительность импульса ($l_g \geq l_p$), положение максимума $S_m = S_d$ и его величина $E(1, S_d) = \kappa S_d^{-2}$ перестают зависеть от длительности экспозиции.

На первом интервале координата максимума не зависит от дистанции задержки. На втором и третьем интервалах координата максимума линейно возрастает с ростом S_d , причем на втором интервале быстрее, чем на третьем, так как на втором интервале при росте S_d координата максимума растет относительно РДЭ. Кроме того, РДЭ смещается с ростом дистанции задержки. На третьем интервале координата максимума относительно РДЭ не меняется, так как достигает крайнего положения $z_m = 1$ на возрастающем участке. Смещение максимума с ростом дистанции задержки обусловлено только смещением РДЭ.

Импульсы реальной формы. Для расчетов регистрируемой энергии отраженного импульса использована реальная форма импульса [20] (рис. 2). Расчеты проводились по формулам (1) и (2).

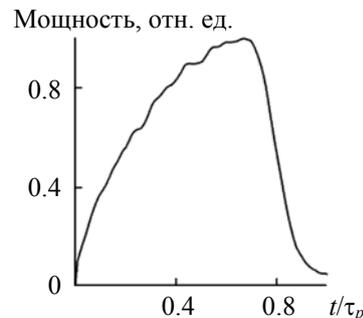


Рис. 2. Реальная форма импульса, используемая в расчетах

На рис. 3 представлены примеры эволюции ПЭП отраженного импульса при росте S_d , рассчитанные при длительности импульса $\tau_p = 100$ нс и длительности экспозиции $\tau_g = 25$. При $S_d < l_p$ ($l_p = 15$ м) сплошная и штриховая линии близки (рис. 3, а и б). На рис. 3, а кривые практически совпадают. Из предположения о совпадении поля зрения приемника излучения с угловым пространством источника подсветки следует ожидать максимума ПЭП бесконечной величины при $S = 0$. Однако из-за учтенного при численном моделировании непересечения полей зрения источника подсветки и приемника излучения на малых расстояниях кривые имеют максимум при $S \approx 0.3$ м и спадают до нуля при $S = 0$. С приближением дистанции задержки к l_p на профиле для реальной формы импульса появляется дополнительный максимум (рис. 3, в). С увеличением S_d дополнительный максимум растет (рис. 3, з), а максимум при $S_d \approx 0.3$ м уменьшается (рис. 3, д). При переходе дистанции задержки границы второго интервала $l_p + l$ (рис. 3, ж) и далее в области $S_d > l_p + l$ дополнительный максимум

становится единственным (рис. 3, *e—з*). ПЭП отраженного импульса в случае прямоугольной формы импульса при больших дистанциях задержки приобретает форму трапеции, искаженную множителем S^{-2} . На рис. 1 изображены положения возрастающих участков РДЭ (5), соответствующих рис. 3, *a, б, г, e* и *ж*. Изображения возрастающих участков РДЭ (5), соответствующих рис. 3, *г* и *e*, совпадают с отрезками *г* и *e*.

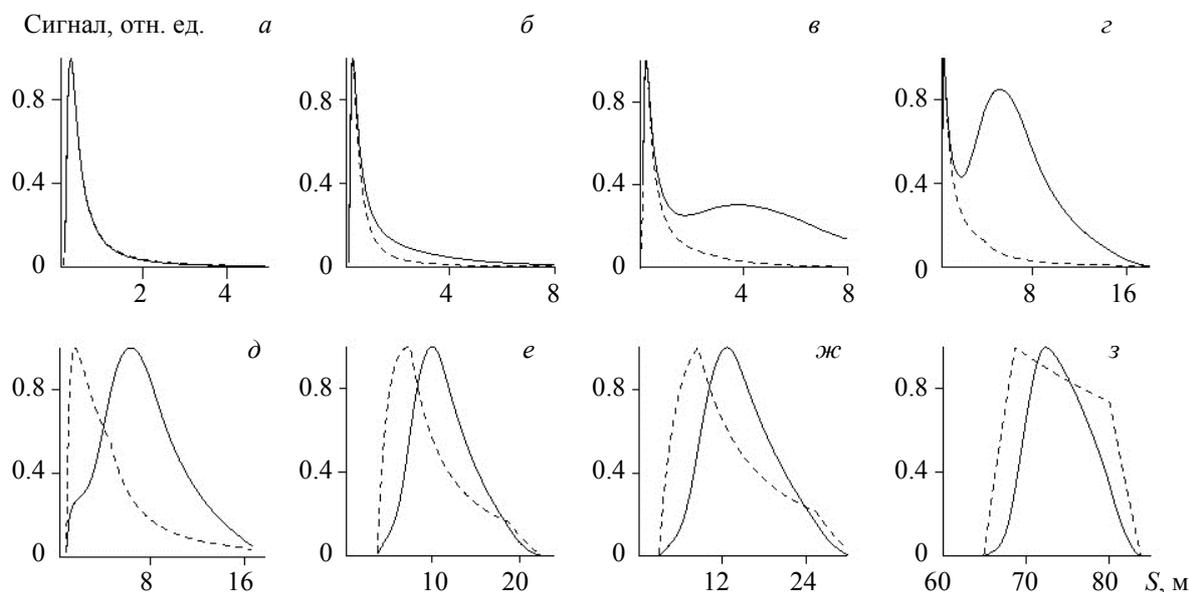


Рис. 3. Нормированные пространственные профили регистрируемой энергии отраженного импульса в зависимости от дистанции до объекта при $\tau_p = 100$ нс ($l_p = 15$ м) и $\tau_g = 25$ нс ($l_g = 3.75$ м); сплошная линия — расчет для реальной формы импульса, штриховая — для прямоугольной; $S_d = 6$ (*a*), 12 (*б*), 14.25 (*в*), 15 (*г*), 15.75 (*д*), 18.75 (*e*), 21 (*ж*) и 80 м (*з*)

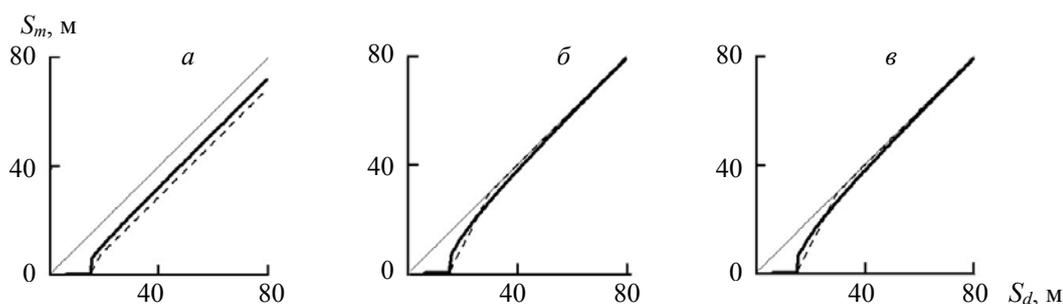


Рис. 4. Зависимости расстояния максимума S_m регистрируемой энергии отраженного импульса от дистанции задержки S_d при разных соотношениях между длительностями импульса и экспозиции; сплошная жирная линия — расчет для реальной формы импульса, штриховая — для прямоугольной, сплошная тонкая — функция $y = x$; $\tau_p = 100$ нс, $\tau_g = 25$ (*a*), 100 (*б*) и 200 нс (*в*)

На рис. 4 показано положение максимума регистрируемой энергии отраженного импульса в зависимости от дистанции задержки при разных соотношениях между длительностями импульса и затвора. Видно определенное качественное сходство результатов, полученных для реальной формы импульса, с закономерностями для прямоугольных импульсов. На участке $0 \leq S_d < l_p$ ($l_p = 15$ м) наибольшая величина регистрируемой энергии отмечается непосредственно перед прибором при $S \approx 0$ независимо от дистанции задержки при всех временах экспозиции τ_g . Максимум регистрируемой энергии, расположенный непосредственно перед прибором при $S \approx 0$, виден также на рис. 3, *a—в*. Да-

лее следует участок, размеры которого сопоставимы с l , на котором координата максимума, растет быстрее, чем дистанция задержки. При больших дистанциях задержки скорость роста координаты максимума приближается к скорости роста S_d . Положение локального максимума при длительностях регистрации, больших длительности импульса, совпадает с положением максимума при длительности регистрации, равной длительности импульса, и приближается к дистанции задержки при ее возрастании. При длительностях регистрации меньше длительности импульса положение максимума отличается от S_d на постоянную величину, зависящую от формы импульса. Как видно из рис. 3 и 4, положение максимума регистрируемой энергии отраженного импульса зависит от дистанции задержки лишь при $S_d > l_p$.

На рис. 5 показана регистрируемая энергия отраженного импульса в локальном максимуме как функция дистанции задержки при различных длительностях экспозиции. При длительностях экспозиции меньше длительности импульса максимум сигнала возрастает с ростом длительности экспозиции, что объясняется возрастающей долей регистрируемой энергии импульса. Дальнейшее увеличение длительности экспозиции не изменяет максимального сигнала, который достигается при длительности экспозиции, равной длительности импульса. Поэтому кривые, соответствующие длительностям затвора 100 и 200 нс, совпадают. Все кривые совпадают при малых S_d . Это качественно согласуется с независимостью максимальной энергии от длительности экспозиции для модели прямоугольных импульсов на втором интервале дистанций задержки.

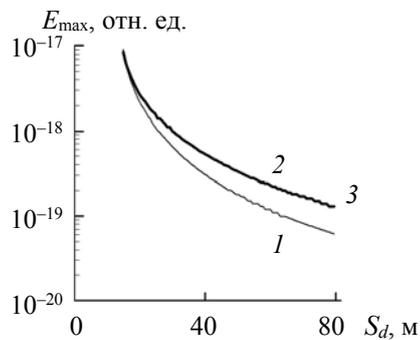


Рис. 5. Максимальная регистрируемая энергия отраженного импульса как функция дистанции задержки S_d при $\tau_p = 100$ нс и $\tau_g = 25$ (1), 100 (2) и 200 нс (3)

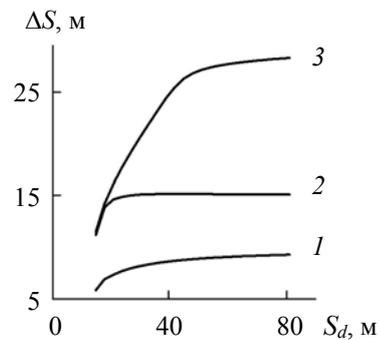


Рис. 6. Зависимость ширины области наилучшей видимости ΔS от дистанции задержки S_d при $\tau_p = 100$ нс и $\tau_g = 25$ (1), 100 (2) и 200 нс (3)

Кроме величины максимального сигнала и положения максимума при наблюдении объектов имеет значение размер области наилучшей видимости, где сигнал близок к максимальному значению. Определим ширину области наилучшей видимости ΔS как разность расстояний, на которых регистрируемая энергия отраженного импульса падает в два раза относительно ее максимального значения. На рис. 6 представлена ширина области наилучшей видимости, рассчитанная для импульса, представленного на рис. 2. Как видно из рис. 6, ширина области наилучшей видимости увеличивается с дистанцией задержки, что связано с уменьшением влияния множителя S^{-2} в выражении для сигнала (1). Ширина области наилучшей видимости также возрастает со временем экспозиции, однако не может превзойти размера зоны видимости $l_p + l_g$.

Закключение. Изучены пространственно-энергетические профили регистрируемой энергии отраженных импульсов прямоугольной и реальной форм. Максимальный сигнал, положение максимума и размер области наилучшей видимости исследованы в зависимости от дистанции задержки при разных соотношениях между длительностями импульса и регистрации сигнала.

В случае импульсов реальной формы, как и прямоугольной, существуют три интервала дистанций задержки, где положение максимума регистрируемой энергии отраженного импульса подчиняется разным закономерностям. Первый интервал характеризуется дистанциями задержки меньше полудлины импульса. Наибольшая регистрируемая энергия в этом случае находится непосредственно перед прибором при $S \approx 0$ независимо от дистанции задержки. Далее следует промежуточный интервал, в котором координата максимума растет заметно быстрее, чем дистанция задержки. Его размеры зависят от формы импульса и сопоставимы с величиной l . При больших дистанциях задержки (на тре-

тьем интервале) скорость роста координаты максимума приближается к скорости роста дистанции задержки. Для эффективного использования активно-импульсных систем видения в рассеивающей среде основной интерес представляют второй и третий интервалы, где дистанции задержки больше полудлины импульса. При этом интервалы времен испускания импульса и его приема не перекрываются и влияние обратного рассеяния минимизируется. Именно в этом случае существует локальный максимум регистрируемой энергии отраженного импульса.

При длительностях экспозиции меньше длительности импульса максимальный сигнал возрастает с ростом длительности экспозиции, что объясняется возрастающей долей регистрируемой энергии импульса. Положение максимума и его величина при длительностях регистрации больше длительности импульса совпадают с положением и величиной максимума при длительности регистрации, равной длительности импульса. Координата максимума приближается к дистанции задержки при росте последней. При длительностях регистрации меньше длительности импульса положение максимума отличается от дистанции задержки на постоянную величину. Ширина области наилучшей видимости увеличивается с дистанцией задержки и со временем экспозиции. Для получения максимального сигнала при фиксированных параметрах импульса время экспозиции должно быть не меньше длительности импульса, для расширения области наилучшей видимости — больше.

Авторы выражают благодарность С. С. Шавелю за помощь в подготовке статьи.

- [1] L. F. Gillespie. *J. Opt. Soc. Am. A*, **56**, N 7 (1966) 883—887
- [2] И. Л. Гейхман, В. Г. Волков. Основы улучшения видимости в сложных условиях, Москва, ООО “Недра-Бизнес-центр” (1999)
- [3] O. K. Steinvall, H. Olsson, G. Bolander, C. A. Groenwall, D. Letalick. *Proc. SPIE*, **3707** (1999) 432—448
- [4] F. Christnacher, S. Schertzer, N. Metzger, E. Bacher, M. Laurenzis, R. Habermacher. *Opt. Express*, **23**, N 26 (2015) 32897, doi:10.1364/OE.23.032897
- [5] Seung-Kyu Park, In-Young Choi, Sung-Hoon Baik, Kyung-Min Jeong. *Opt. Appl.*, **XLVII**, N 4, (2017), doi: 10.5277/oa170404
- [6] E. P. Zege, A. P. Ivanov I. L. Katsev. *Image Transfer Through a Scattering Medium*, Berlin, Springer-Verlag (1991)
- [7] Л. С. Долин. *УФН*, **179**, № 5 (2009) 553—560
- [8] Л. С. Долин, И. М. Левин. *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*, **8**, № 2 (2015) 22—35
- [9] М. И. Курячий, А. Г. Костевич, И. В. Гальчук. *Пространственно-временная ранговая обработка изображений в видеоинформационных системах*, Томск, ТУСУРа (2013)
- [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] J. Busck, H. Heiselberg. *Appl. Opt.*, **43** (2004) 4705—4710
- [13] J. Busck. *Opt. Eng.*, **44** (2005) 116001
- [14] P. Andersson. *Opt. Eng.*, **45** (2006) 034301
- [15] B. Goehler, P. Lutzmann. *Proc. SPIE*, **8897** (2013) 889708
- [16] M. Laurenzis, F. Christnacher, D. Monnin. *Opt. Lett.*, **32**, N 21 (2007) 3146—3148
- [17] X. Wang, Y. Li, Y. Zhou. *Appl. Opt.*, **52**, N 30 (2013) 7399—7046
- [18] В. В. Капустин, А. К. Мовчан, Е. В. Зайцева, М. И. Курячий. *Транспортные системы и технологии*, **4**, № 1 (2018) 68—83
- [19] Б. Ф. Кунцевич, В. П. Кабашников. *Журн. прикл. спектр.*, **87**, № 6 (2020) 984—989
- [20] В. А. Горобец, Б. Ф. Кунцевич, Д. В. Шабров. *Журн. прикл. спектр.*, **84**, № 5 (2017) 850—858
- [V. A. Gorobetz, B. F. Kuntsevich, D. V. Shabrov. *J. Appl. Spectr.*, **84**, N 5 (2017) 850—858]