

ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СИГНАЛОВ АКТИВНО-ИМПУЛЬСНЫХ СИСТЕМ ВИДЕНИЯ ОТ ДИФФУЗНО ОТРАЖАЮЩЕЙ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

В. П. Кабашников*, Б. Ф. Кунцевич

УДК 621.384.3:621.391

<https://doi.org/10.47612/0514-7506-2022-89-1-102-109>

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

(Поступила 1 ноября 2021)

Исследованы характеристики пространственно-энергетического профиля регистрируемой энергии импульсов, отраженных от диффузно рассеивающей горизонтальной плоскости при ее наклонном освещении. Максимальный сигнал, положение максимума и размер области наилучшей видимости исследованы в зависимости от дистанции задержки при разных соотношениях между длительностями импульса и временами регистрации сигнала. Для импульсов прямоугольной формы получены аналитические результаты. Результаты, относящиеся к импульсам реальной формы, получены численными методами.

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

The spatial-energy profile characteristics of the recorded pulse energy reflected from a diffusely scattering horizontal plane under its incline illumination 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. Analytical results are obtained for rectangular-shaped pulses. The results related to real-form pulses are obtained by numerical methods.

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

Введение. Действие активно-импульсных систем видения (АИСВ) основано на импульсном освещении объектов при синхронизированной с освещающим импульсом регистрации отраженного сигнала (стробировании) [1, 2]. Регистрация сигнала начинается спустя некоторое время задержки после выхода переднего фронта импульса и длится время, сопоставимое с длительностью импульса. Такие системы позволяют видеть объекты в пределах относительно узкого пространственного слоя (зоны видимости), расположенного на расстоянии, определяемом временем задержки, и имеющего глубину, зависящую от длительности импульса и времени 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 также применяются для оценки расстояний и получения 3D-изображений [12—17].

Для выбора оптимальных условий наблюдения сцены, оценки расстояний или получения 3D-изображений необходимо знать пространственно-энергетический профиль (ПЭП) сигналов АИСВ, т. е. зависимость регистрируемой энергии отраженного импульса от расстояния до объекта при фиксированном времени задержки. Экспериментальные и численные исследования ПЭП сигнала

SPATIAL DISTRIBUTION OF ACTIVE-PULSE VISION SYSTEM SIGNALS FROM A DIFFUSELY REFLECTING UNDERLYING SURFACE

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

лов АИСВ выполнены в работах [15, 18—20]. При расчете ПЭП сигналов АИСВ неявно полагалось, что при изменении дальности освещенность каждого элемента поверхности отражающего объекта изменяется только из-за расходимости подсвечивающего излучения. Ориентация же элементов поверхности относительно направления падающего излучения при изменении дальности остается неизменной. Это условие приблизительно реализуется и в экспериментах по регистрации ПЭП. В них в качестве отражателя обычно используется устанавливаемый на разных расстояниях щит, ориентированный перпендикулярно оптической оси АИСВ.

Иная ситуация реализуется при наклонном освещении подстилающей поверхности с помощью приподнятой АИСВ, установленной, например, на штативе или транспортном средстве. Элементы подстилающей поверхности, находящиеся на разных расстояниях от источника подсветки, имеют разную ориентацию относительно направления падающего излучения. Это обстоятельство влияет на их освещенность и на вид ПЭП сигналов, отраженных от подстилающей поверхности. Впервые влияние угла подсветки на вид ПЭП при диффузном отражении от однородной подстилающей поверхности рассматривалось в работе [21], где проведено численное исследование вида ПЭП в предположении прямоугольности формы импульса и временной зависимости чувствительности приемника.

Цель настоящей работы — найти положение и размер участков подстилающей поверхности, дающих сигнал, близкий к максимальному, оценить величину максимума в зависимости от времени задержки, длительности импульса и времени регистрации сигнала. Для случая прямоугольных импульсов приводятся аналитические результаты, а характеристики ПЭП при диффузном отражении от однородной подстилающей поверхности при реальной форме импульсов исследуются численно.

Сигнал АИСВ при диффузном отражении от однородной горизонтальной поверхности. Пусть АИСВ, расположенная на высоте H , посылает на однородную горизонтальную подстилающую поверхность световые импульсы мощностью $W(t)$ и длительностью τ_p . Яркость диффузно отраженного излучения на расстоянии D от проекции источника на горизонтальную плоскость:

$$J(t) = \rho W(t - S/c) \cos \vartheta / \pi \Omega S^2,$$

где Ω — телесный угол осветителя; ρ — коэффициент отражения; $S = \sqrt{H^2 + D^2}$, ϑ — угол между нормалью к поверхности и направлением на источник, $\cos \vartheta = H/S$, c — скорость света. Мощность входящего в прибор отраженного излучения:

$$N(t) = \omega \Sigma J(t) = \omega \Sigma \rho W(t - 2S/c) H / \pi \Omega S^3,$$

где ω — телесный угол поля зрения приемника, Σ — площадь входного отверстия прибора.

По истечении времени задержки t_d , которое отсчитывается от момента выхода переднего фронта освещающего импульса, приемник открывается и находится в открытом состоянии в течение времени τ_g . Умножая $N(t)$ на зависящую от времени чувствительность приемника и интегрируя полученное произведение по времени от t_d до $t_d + \tau_g$, получаем сигнал — регистрируемую энергию импульса, отраженного от участка подстилающей поверхности, расположенного на расстоянии S от АИСВ:

$$E(S, S_d) = \kappa H S^{-3} R(S - S_d), \quad (1)$$

где R — свертка по времени t относительной чувствительности фотоприемника $Q(t)$ и мощности $f(t) = W(t)/U$ освещающего импульса, отнесенной к его полной энергии U :

$$R(x) = \int_0^{\tau_g} Q(t + 2x/c) f(t) dt, \quad (2)$$

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

где $S_d = ct_d/2$ — дистанция задержки; κ — константа, учитывающая поля зрения осветителя и приемника, коэффициент диффузного отражения поверхности, энергию импульса, пиковую чувствительность приемника, площадь входного отверстия прибора. Выражение (1) записано в предположении, что источник подсветки и приемник излучения пространственно совмещены. Сигнал отличен от нуля, если только отраженный импульс поступает на вход прибора в течение времени от t_d до $t_d + \tau_g$.

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 расстояний S . Нас интересует положение максимума сигнала АИСВ на подстилающей поверхности в зависимости от горизонтального расстояния D . Его можно найти, приравняв к нулю производную по D от регистрируемой энергии:

$\partial E(S(D), S_d)/\partial D = \partial E(D, S_d)/\partial S \cdot \partial S/\partial D = 0$. В практически значимых ситуациях $\partial S/\partial D \neq 0$. Поэтому нахождение максимума ПЭП по D сводится к нахождению максимума ПЭП по длине наклонной трассы S и последующему переходу к горизонтальной координате по формуле $D = \sqrt{S^2 - H^2}$. Для аналитических оценок используем модель прямоугольных импульсов. Численные результаты получены для формы импульса, близкой к реальной.

Модель прямоугольных импульсов. Анализ этого случая при изменяющемся угле подсветки аналогичен случаю постоянного угла подсветки [22]. Введем характерные длины l_p и l_g :

$$l_p = c\tau_p/2, \quad l_g = c\tau_g/2. \quad (4)$$

В случае прямоугольных импульсов РДЭ имеет форму трапеции, если $l_p \neq l_g$, или треугольника, если $l_p = l_g$:

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

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

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

$$R(x) = 0 \quad \text{при } x < -l_p \text{ и } x > l_g, \quad (8)$$

$$\text{где } l = \min(l_g, l_p). \quad (9)$$

РДЭ линейно растет 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 расстоянием S .

Рассмотрим функцию $E(S, S_d)$ на возрастающем участке РДЭ (5). Введем безразмерную координату $z = (l_p + x)/l$. На возрастающем участке РДЭ координата z изменяется от 0 до 1. Тогда

$$S = lz - l_p + S_d \quad (10)$$

и функция $E(S, S_d)$ может быть записана в виде

$$E(z, S_d) = \kappa(l/l_p) Hz(lz - l_p + S_d)^{-3}. \quad (11)$$

Производная от (11) по z имеет вид:

$$\partial E(z, S_d)/\partial z = -S^{-4} \kappa(l/l_p) H \{2lz - (S_d - l_p)\}. \quad (12)$$

Рассмотрим случай дистанций задержки, меньших полудлины импульса ($S_d < l_p$). В этом случае производная (12) отрицательна, отрицательны также 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 (11) монотонно спадает с расстоянием S и ее максимальное значение находится в точке $S_m = 0$ (m — максимум). При этом величина регистрируемой энергии отраженного импульса стремится к бесконечности при $S \rightarrow S_m$. Такой результат является следствием предположения о пространственном совмещении приемника излучения с источником подсветки.

Рассмотрим случай дистанций задержки $S_d \geq l_p$. Приравнявая к нулю производную (12), получаем положение локального максимума $z_m = (S_d - l_p)/2l$, что с учетом (10) дает:

$$S_m = 3(S_d - l_p)/2. \quad (13)$$

Отсюда следует, что при дистанции задержки $S_d = l_p$ локальный максимум регистрируемой энергии отраженного импульса находится в начале возрастающего участка РДЭ (5) в точке $z_m = 0$ при $S_m = 0$. С ростом дистанции задержки величина 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 $z_m = 1$ в конце возрастающего участка РДЭ при дистанции задержки $S_d = l_p + 2l$.

При дистанциях задержки, превышающих $l_p + 2l$, положение максимума уже не определяется из равенства нулю производной (12). Максимум возникает в конце растущего участка при $z_m = 1$ на стыке растущего и последующего (невозрастающего) участков РДЭ. Таким образом, при $S_d \geq l_p$ расстояние S_m , на котором находится максимум, можно записать в виде

$$S_m = \min[3(S_d - l_p)/2, l + S_d - l_p]. \quad (14)$$

Относительно положения максимума регистрируемой энергии отраженного импульса в случае прямоугольных импульсов можно сделать вывод, что существуют три интервала дистанций задержки, где положение максимума регистрируемой энергии отраженного импульса подчиняется разным закономерностям.

На первом интервале, где дистанции задержки удовлетворяют условию $0 < S_d < l_p$, максимальное значение энергии находится в точке $S_m = 0$ независимо от дистанции задержки.

Второй интервал характеризуется дистанциями задержки, удовлетворяющими условию

$$l_p \leq S_d \leq l_p + 2l. \quad (15)$$

При возрастании дистанций задержки от l_p до $l_p + 2l$ координата локального максимума S_m возрастает от 0 до $3l$. При этом максимум сигнала смещается от начала к концу возрастающего участка РДЭ при одновременном смещении самой РДЭ в сторону больших расстояний S . В рассматриваемом интервале дистанций задержки (15) максимальная энергия отраженного импульса

$$E(z_m, S_d) = 4\kappa H/[27l_p(S_d - l_p)^2]$$

независимо от длительности открытого состояния приемника τ_g . Указанная независимость может возникнуть, если только затвор закрывается после прихода заднего фронта импульса. Другими словами, потока энергии на входе в прибор уже нет, а затвор еще открыт. Именно в этом случае вариации величины τ_g не влияют на регистрируемую энергию. В то же время из (13) и (15) следует $S_d \geq S_m$, или $t_d \geq 2S_m/c$. Это означает, что передняя часть импульса отрезается затвором и не дает вклада в сигнал. В результате получаем, что на втором интервале вклад в максимальную регистрируемую энергию дает только хвост импульса.

На третьем интервале, где дистанции задержки удовлетворяют условию $S_d > l_p + 2l$, 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 в третьем интервале дистанций задержки

$$E(1, S_d) = \kappa(l/l_p)H(l - l_p + S_d)^{-3}.$$

При длительностях экспозиции, меньших длительности импульса ($l_g < l_p$), часть импульса неизбежно отрезается затвором. В данном случае справедливо неравенство $S_m < S_d$, откуда следует, что отрезается и не дает вклада в сигнал передняя часть импульса. При длительностях экспозиции, равных или превосходящих длительность импульса ($l_g \geq l_p$), положение максимума $S_m = S_d$ и его величина $E(1, S_d) = \kappa H S_d^{-3}$ перестают зависеть от длительности открытого состояния приемника τ_g . В этом случае передний фронт импульса приходит к АИСВ точно в момент открытия затвора, передняя часть импульса не отрезается затвором и фотоприемник освещается в течение всей длительности импульса τ_p независимо от длительности открытого состояния приемника τ_g .

На подстилающей поверхности локальный максимум может возникнуть только при условии $S_m \geq H$. Поэтому первый интервал дистанций задержки, где $S_m = 0$, к появлению локального максимума на подстилающей поверхности не приводит. Максимум на подстилающей поверхности появляется, начиная с некоторой минимальной задержки S_d^{\min} :

$$S_d^{\min} = l_p + \max[2H/3, H - l], \quad (16)$$

причем максимум появляется при $D_m = 0$. Если $H < 3l$, то максимум на подстилающей поверхности может возникнуть при дистанциях задержки, относящихся как ко второму, так и к третьему интервалу. На подстилающей поверхности граница между ними лежит при $D_m^* = \sqrt{(3l)^2 - H^2}$. В случае $H > 3l$ максимум на подстилающей поверхности возникает только при дистанциях задержки, относящихся к третьему интервалу. При дистанциях задержки, относящихся ко второму интервалу, координата максимума растет заметно быстрее, чем дистанция задержки. При дистанциях задержки, относящихся к третьему интервалу, скорость роста координаты максимума приближается к скорости роста дистанции задержки.

Импульсы реальной формы. Для численных расчетов регистрируемой энергии отраженного импульса использовалась реальная форма импульса [23] (рис. 1). Расчеты проводились по формулам (1) и (2). Предполагалось, что поле зрения прибора в вертикальной плоскости составляет 90° и ограничено горизонтальным лучом и лучом, направленным вертикально вниз. В этом случае освещается вся плоскость перед прибором.

На рис. 2 показано положение максимума регистрируемой энергии отраженного импульса в зависимости от дистанции задержки при разных соотношениях между длительностями импульса и затвора. Если поле зрения прибора $<90^\circ$, то представленные результаты следует рассматривать как потенциальные максимумы, которые реализуются при наведении на них поля зрения прибора.

Как видно из рис. 2, зависимость координаты максимума регистрируемой энергии отраженного импульса на подстилающей поверхности D_m от дистанции задержки S_d для реальной формы импульса качественно похожа на такую же зависимость для прямоугольной формы импульса. При малых дистанциях задержки максимум на подстилающей поверхности отсутствует. С увеличением дистанции задержки он появляется, причем тем позже, чем выше АИСВ. Дистанции задержки, при которых появляется максимум на подстилающей поверхности, для импульсов реальной формы примерно такие же, как и для импульсов прямоугольной формы. При малых дистанциях задержки координата максимума растет быстрее линейной функции, а начиная с некоторой дистанции задержки (порядка $l_p + 2l$),

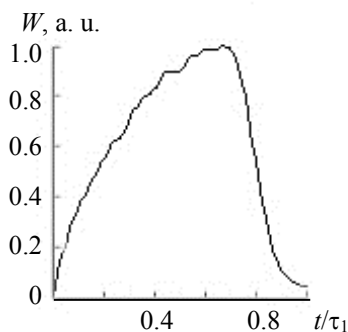


Рис. 1. Реальная форма импульса, используемая в расчетах

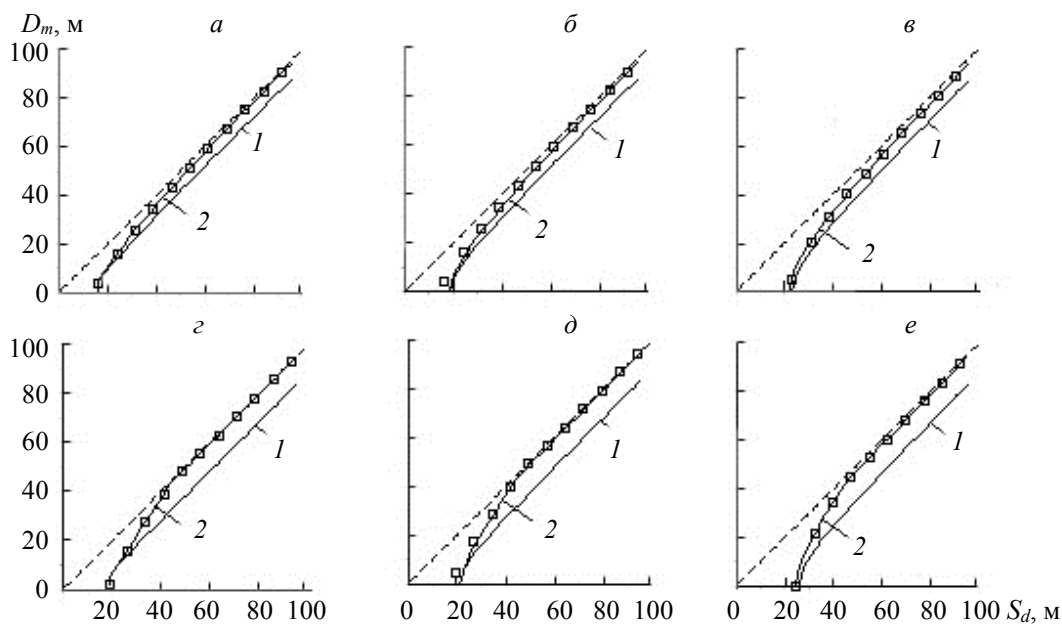


Рис. 2. Расстояние максимума регистрируемой энергии отраженного импульса D_m в зависимости от дистанции задержки S_d при $\tau_p = 100$ нс и $\tau_g = 25$ (1), 100 (2) и 200 нс (точки) для реальной (а—в) и прямоугольной (г—е) форм импульса при высотах расположения АИСВ $H = 5$ (а, г), 10 (б, д), 15 (в, е), штриховая линия — функция $D_m = S_d$

координата максимума линейно растет с дистанцией задержки. При $\tau_g < \tau_p$ максимум находится ближе к АИСВ, чем при $\tau_g \geq \tau_p$. Кривые, соответствующие случаям $\tau_g > \tau_p$ (точки), полностью совпадают с кривыми, соответствующими случаю $\tau_g = \tau_p$. Различие между импульсами реальной и прямоугольной форм состоит в том, что для реальных импульсов максимум появляется при меньших дистанциях задержки, а его координата позже выходит на линейную зависимость от дистанции задержки. При $\tau_g < \tau_p$ для импульсов реальной формы максимум располагается дальше от АИСВ, чем для прямоугольных импульсов.

На рис. 3 показана регистрируемая энергия отраженного импульса в локальном максимуме как функция дистанции задержки при различных длительностях экспозиции и импульса. При длительностях экспозиции, меньших длительности импульса, максимум сигнала возрастает с увеличением длительности экспозиции (кривые 1 и 2), что объясняется возрастающей долей регистрируемой энергии импульса. Предельная величина сигнала достигается при длительности экспозиции, равной длительности импульса. Дальнейшее увеличение длительности экспозиции не меняет предельной величины сигнала. Поэтому кривые 2 и 3, соответствующие длительностям затвора 100 и 200 нс, совпадают. Предельная величина сигнала растет с увеличением длительностей импульса и экспозиции (кривые 2 и 4). С увеличением высоты АИСВ спад максимального сигнала с удалением от АИСВ происходит медленнее. Все кривые с одинаковой длительностью импульса и разными экспозициями сливаются при малых дистанции задержки. Это качественно согласуется с независимостью максимальной энергии от длительности экспозиции для модели прямоугольных импульсов на втором интервале дистанций задержки.

Кроме величины максимального сигнала и положения максимума при наблюдении объектов имеет значение размер области наилучшей видимости, где сигнал близок к максимальному значению. Определим характерную длину области наилучшей видимости L как расстояние между точками, где отраженный сигнал в два раза меньше максимального. Если на границе зоны подсветки ($D = 0$) сигнал больше половины максимума, то ближней границей области наилучшей видимости будем считать границу зоны подсветки:

$$L = D_2 - D_1, \tag{17}$$

где

$$D_1 = \sqrt{S_1^2 - H^2} \text{ при } S_1 > H, \\ D_1 = 0 \text{ при } S_1 \leq H, \\ D_2 = \sqrt{S_2^2 - H^2},$$

S_1 и S_2 — наклонные дальности, где отраженный сигнал в два раза меньше максимального.

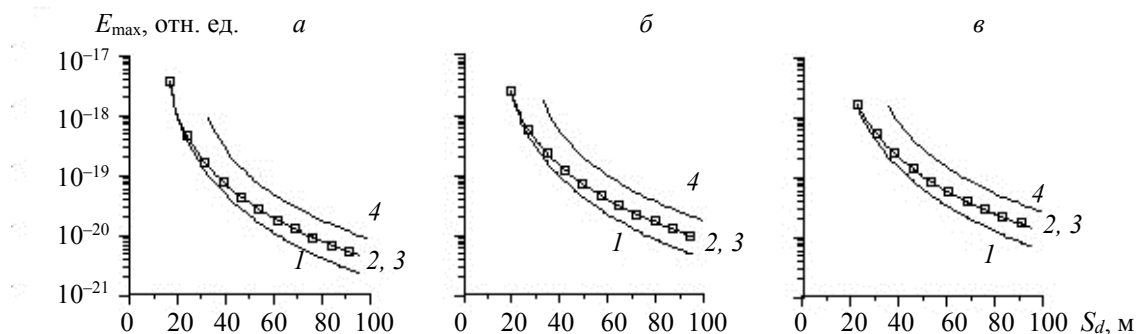


Рис. 3. Максимальная регистрируемая энергия отраженного импульса как функция дистанции задержки при $\tau_p = 100$ нс и $\tau_g = 25$ (1), 100 (2) и 200 нс (3), а также при $\tau_p = \tau_g = 200$ нс (4); $H = 5$ (а), 10 (б) и 15 м (в)

Границы D_1 и D_2 как функции дистанции задержки представлены на рис. 4, там же приведена координата максимума. Видно, что границы растут с ростом дистанции задержки. Увеличение высоты АИСВ приводит к росту дальней границы при малых дистанциях задержки, но мало влияет на положение границ при больших дистанциях задержки. При равных длительностях импульса и экспозиции координата максимума в основном находится посередине между границами. При длительностях экспозиции, меньших длительности импульса, координата максимума смещена к ближней границе области наилучшей видимости.

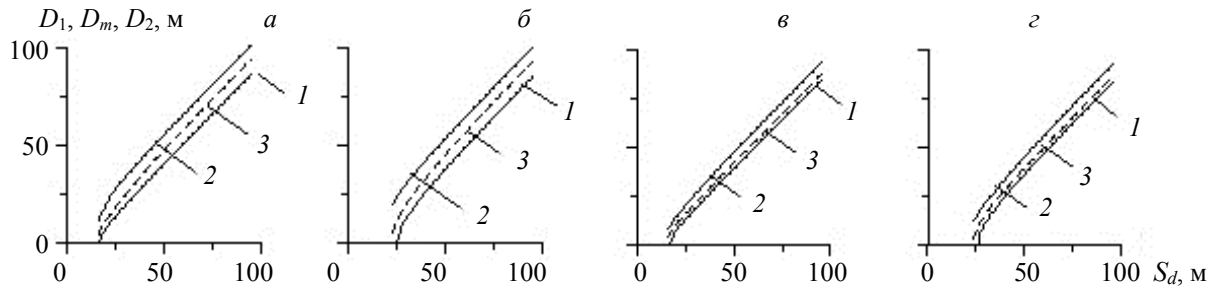


Рис. 4. Границы области наилучшей видимости D_1 (1), D_2 (2) и координата максимума сигнала (3) в зависимости от дистанции задержки при $\tau_p = 100$ нс и $\tau_g = 100$ (а, б) и 25 нс (в, г); $H = 5$ (а, в) и 15 м (б, г)

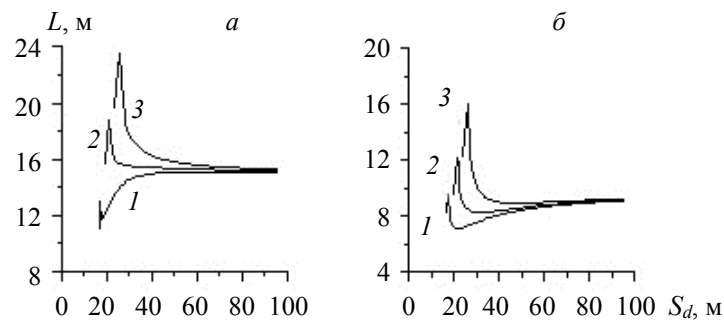


Рис. 5. Длина области наилучшей видимости в зависимости от дистанции задержки при $\tau_p = 100$ нс и $H = 5$ (1), 10 (2) и 15 м (3); $\tau_g = 100$ (а) и 25 нс (б)

На рис. 5 представлена длина области наилучшей видимости L на подстилающей поверхности при условии появления локального максимума в зависимости от дистанции задержки. Обращает на себя внимание наличие пика при малых дистанциях задержки. При малых дистанциях задержки, когда $D_1 = 0$, длина области наилучшей видимости возрастает с увеличением S_d за счет роста дальней границы D_2 . Пик образуется при условии $S_1 = H$. Обозначим S_d^* дистанцию задержки, при которой образуется пик. При $S_d > S_d^*$ имеет место резкий спад, обусловленный преимущественным ростом границы D_1 . В этом можно убедиться, взяв производную от L по S_d и учтя, что S_1 растет с дистанцией задержки. При $S_d \rightarrow S_d^*$ производная от D_1 по S_d стремится к бесконечности, что свидетельствует о резком спаде длины L в области $S_d > S_d^*$. Длина области наилучшей видимости L довольно сильно зависит от высоты АИСВ при малых дистанциях задержки. При дистанциях задержки, намного больших высоты АИСВ, длина области наилучшей видимости перестает зависеть от высоты АИСВ.

Заключение. При наблюдении с помощью приподнятой активно-импульсной системы видения объектов, расположенных на подстилающей поверхности, регистрируется также сигнал, отраженный от подстилающей поверхности. Элементы подстилающей поверхности, находящиеся на разных расстояниях от источника подсветки, имеют разную ориентацию относительно направления падающего излучения. Это влияет на их освещенность (она пропорциональна косинусу угла падения) и на вид пространственно-энергетического профиля сигналов, отраженных от подстилающей поверхности. На пространственно-энергетический профиль могут также влиять неоднородность подстилающей поверхности и угловая неравномерность подсветки. Для импульсов прямоугольной формы получены аналитические результаты. Результаты, относящиеся к импульсам реальной формы, получены численными методами. Качественно они совпадают с результатами для прямоугольных импульсов. Локальный максимум регистрируемой энергии отраженного импульса возникает на подстилающей поверхности лишь при дистанциях задержки, больших некоторого минимального значения S_d^{\min} , зависящего от длительности и формы импульса, времени экспозиции и высоты активно-импульсной системы видения. С ростом дистанции задержки координата максимума сначала растет быстрее дистанции задержки, затем рост замедляется и координата максимума с точностью до постоянного слагаемого, зависящего от формы импульса и соотношения длительностей импульса и экспозиции, приближается к дистанции задержки.

Максимальный сигнал активно-импульсной системы видения спадает с увеличением дистанции задержки. С увеличением высоты активно-импульсной системы видения скорость спада уменьшается. При увеличении времени экспозиции до длительности импульса сигнал растёт, после чего перестаёт зависеть от времени экспозиции. Исключение составляет область малых дистанций задержки, где приближительная независимость от длительности экспозициями имеет место при всех соотношениях между длительностями экспозиции и импульса. Длина области наилучшей видимости увеличивается с высотой активно-импульсной системы видения. Наиболее сильно эта зависимость проявляется при малых дистанциях задержки. При дистанциях задержки, намного больших высоты активно-импульсной системы видения, длина области наилучшей видимости не зависит от высоты активно-импульсной системы видения.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект Ф21ЭТ-013).

- [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) 7046—7399
- [18] J. Busck. *Optical Identification of Sea-Mines. Gated Viewing Three-Dimensional Laser Radar*. Ph.-D. Thesis Danish Defence Research Establishment and Orsted DTU (2005) 138
- [19] В. В. Капустин, А. К. Мовчан, Е. В. Зайцева, М. И. Курячий. *Транспортные системы и технологии*, **4**, № 1 (2018) 68—83
- [20] Б. Ф. Кунцевич, В. П. Кабашников. *Журн. прикл. спектр.*, **87**, № 6 (2020) 984—989 [B. F. Kuntsevich, V. P. Kabashnikov. *J. Appl. Spectr.*, **87** (2020) 1112—1116]
- [21] Б. Ф. Кунцевич, В. П. Кабашников, Д. В. Шабров. *Журн. прикл. спектр.*, **88**, № 5 (2021) 783—791 [B. F. Kuntsevich, V. P. Kabashnikov, D. V. Shabrov. *J. Appl. Spectr.*, **88** (2021) 1012—1019]
- [22] В. П. Кабашников, Б. Ф. Кунцевич. *Журн. прикл. спектр.*, **88**, № 1 (2021) 137—143 [V. P. Kabashnikov, B. F. Kuntsevich. *J. Appl. Spectr.*, **88** (2021) 125—131]
- [23] 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]