

## ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ЗОНЫ ВИДИМОСТИ АКТИВНО-ИМПУЛЬСНЫМИ СИСТЕМАМИ ВИДЕНИЯ НА МАЛЫХ ДИСТАНЦИЯХ

Б. Ф. Кунцевич\*, В. П. Кабашников

УДК 621.384.3:621.391

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

(Поступила 4 июня 2020)

Численно и экспериментально исследованы особенности формирования пространственно-энергетического профиля зоны видимости активно-импульсными системами видения при дистанциях задержки, сопоставимых с длиной зоны видимости. Рассмотрен случай, когда длительность импульса подсветки меньше длительности регистрации. При расчетах форма импульса подсветки задавалась либо близкой к реальной, либо прямоугольной, временной профиль чувствительности фотоприемника выбирался прямоугольным. Результаты расчетов для реального профиля импульса сопоставляются с данными для прямоугольного профиля. Численные исследования для реального импульса показывают, что в отличие от случая прямоугольного импульса положение максимума на зависимости сигнала от дальности не совпадает с дистанцией задержки. Это различие уменьшается (в предельном случае исчезает) при увеличении отношения дистанции задержки к пространственной длине импульса подсветки. Получено хорошее согласие результатов расчетов с экспериментальной зависимостью регистрируемого сигнала от дальности.

**Ключевые слова:** активно-импульсная система видения, закономерности формирования зоны видимости, дистанция задержки, положение максимума сигнала.

*The features of formation of the range-energy profile of the visibility zone of active-pulse vision systems (AIS) at delay distances comparable to the length of the visibility zone are studied numerically and experimentally. The case of illumination pulse durations shorter than registration durations is considered. During calculations, the shape of the illumination pulse was set either close to the real one or rectangular, and the time sensitivity profile of the photodetector was chosen rectangular. The calculation results for the real pulse profile are compared with the data for the rectangular profile. Numerical studies for a real pulse show that, in contrast to the case of a rectangular pulse, the position of the maximum on the signal-distance dependence does not coincide with the delay distance. This difference decreases when the ratio of the delay distance to the spatial length of the illumination pulse increases. The results of calculations are in good agreement with the measured dependence of the recorded signal value on the distance.*

**Keywords:** active-pulse vision system, formation patterns of the visibility zone, delay distance, position of the maximum signal.

**Введение.** Для решения различных научных и практических задач в настоящее время широко используются активно-импульсные системы видения (АИСВ) [1—4]. В АИСВ осуществляется в частотно-импульсном режиме подсветка объектов наблюдения лазерным излучением с типичной длительностью  $\Delta t_{\text{лаз}}$  от десятка до нескольких сотен наносекунд. Синхронно с лазерной подсветкой, но с некоторой задержкой по времени  $\Delta t_{\text{зад}}$  на короткое время  $\Delta t_{\text{ЭОП}}$ , обычно сравнимое с  $\Delta t_{\text{лаз}}$ , включается фотоприемник (строб-импульс). В качестве фотоприемника обычно используется электронно-оптический преобразователь (ЭОП). АИСВ позволяют осуществлять наблюдение объектов в сравнительно узкой полосе пространства, называемой зоной видимости.

---

## FEATURES OF VISIBILITY ZONE FORMATION BY ACTIVE-PULSE VISION SYSTEMS AT SHORT DISTANCES

**B. F. Kuntsevich\*, V. P. Kabashnikov** (SSPA “Optics, Optoelectronics, and Laser Technology”, Minsk, 220072, Belarus; e-mail: bkun@ifanbel.bas-net.by)

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 пространства. В последующие годы такие системы начали широко применяться для определения расстояний до объектов, построения трехмерных изображений и решения других задач [5—11].

Существуют два способа наблюдения с помощью АИСВ. При первом расстояние  $S_{об}$  между АИСВ и объектом (стеной здания, автомобилем и др.) фиксировано (см., например, [5, 7, 12, 13]). Наблюдение осуществляется путем изменения времени  $\Delta t_{зад}$  (или расстояния задержки  $S_{зад} = c\Delta t_{зад}/2$ , где  $c$  — скорость света в среде) между передними фронтами лазерных импульсов и строб-импульсов. При этом последовательно просматриваются различные слои пространства, т. е. при перемещении зоны видимости объект “входит” в зону, а затем “выходит” из нее. При втором способе (см., например, [14—17]) на пульте управления устанавливается некоторое фиксированное значение  $S_{зад}$ , которое определяет расположение зоны видимости на соответствующем расстоянии от АИСВ. В данном случае в пределах зоны видимости могут наблюдаться объекты (автомобиль, человек и т. д.), перемещающиеся вдоль оптической оси системы, или совокупность неподвижных объектов, находящихся на разных расстояниях.

Рассмотрим второй способ наблюдения. При этом пространственное распределение отраженного сигнала представляет интерес с точки зрения как оптимизации условий наблюдения объектов, так и определения расстояний методами, чувствительными к зависимости сигнала от расстояния. Экспериментальные пространственно-энергетические профили (ПЭП) сигналов АИСВ, т. е. зависимости регистрируемого сигнала от расстояния до объекта при сравнительно малых расстояниях задержки ( $S_{зад} \sim 15—30$  м), для второго способа наблюдения получены в работе [18], из которой следует, что данная зависимость довольно сложная и характеризуется наличием резкого максимума, смещенного к началу зоны видимости. На пространственное распределение сигнала могут оказывать влияние, в частности, форма импульса подсветки, степень удаленности зоны видимости от АИСВ и соотношение этого расстояния с длиной зоны видимости.

Цель настоящей работы — численное исследование и экспериментальная проверка влияния указанных факторов на ПЭП сигналов АИСВ для второго способа наблюдения. За основу взяты результаты, полученные ранее для прямоугольных импульсов подсветки [16]. Для дальнейшего рассмотрения представляется целесообразным привести здесь краткие сведения.

**Известные выражения для характерных расстояний зоны видимости при втором способе наблюдения.** Ранее в [16] были получены аналитические выражения для четырех характерных расстояний зоны видимости. Предполагалось, что импульсы подсветки и строб-импульсы имеют прямоугольную форму. Расстояния  $S_{нач}$  и  $S_{кон}$  соответствуют начальной и конечной точкам зоны видимости,  $S_{нач-100\%}$  и  $S_{кон-100\%}$  — граничные расстояния, где принимаемый сигнал регистрируется в течение 100 % интервала времени открытого (включенного) состояния ЭОП (при  $\Delta t_{лаз} > \Delta t_{ЭОП}$ ) либо в течение 100 % длительности импульса подсветки (при  $\Delta t_{ЭОП} > \Delta t_{лаз}$ ). Для объектов, находящихся на дистанции  $S_{нач-100\%}—S_{кон-100\%}$ , в первом случае имеет место постоянная интенсивность импульса в течение времени открытого состояния ЭОП, во втором — во временной интервал строба попадает импульс целиком и регистрируется сигнал, пропорциональный полной энергии отраженного импульса. При записи выражений в [16] принято, что истинная временная задержка  $\Delta t_{зад}$  с учетом реальных экспериментальных условий может быть представлена в виде суммы двух слагаемых:  $\Delta t_{зад} = \Delta t_{зад-упр} + \Delta t_{зад-x}$ , где  $\Delta t_{зад-упр}$  — известная задержка, обусловленная управляющими импульсами контроллера АИСВ, обычно используемая для вычисления указанного расстояния задержки  $S_{зад} = c\Delta t_{зад-упр}/2$ ;  $\Delta t_{зад-x}$  — составляющая, зависящая от конструктивных особенностей и других параметров системы, которую сложно экспериментально измерить.

Приведенные выражения определяют связь характерных расстояний  $S_{нач}$ ,  $S_{нач-100\%}$ ,  $S_{кон-100\%}$  и  $S_{кон}$  с временами  $\Delta t_{лаз}$ ,  $\Delta t_{ЭОП}$ ,  $\Delta t_{зад-x}$  и расстоянием задержки  $S_{зад}$ . На основании этих соотношений записаны формулы для длин зоны видимости  $\Delta S_{ЗВ} = S_{кон} - S_{нач}$ , участков с максимально возможной долей (100 %) регистрируемой энергии импульсов подсветки  $\Delta S_{100\%} = S_{кон-100\%} - S_{нач-100\%}$ , фронтов  $\Delta S_{фр} = S_{нач-100\%} - S_{нач}$  и спадов  $\Delta S_{сп} = S_{кон} - S_{кон-100\%}$ . В [16] приведены некоторые алгоритмы определения расстояний до объектов и параметров самих АИСВ для второго способа наблюдения. На основании выражений можно сделать вывод, что при  $\Delta t_{лаз} \neq \Delta t_{ЭОП}$  ПЭП имеет форму трапеции, а при  $\Delta t_{лаз} = \Delta t_{ЭОП}$  — треугольника (точки  $S_{нач-100\%}$  и  $S_{кон-100\%}$  “сливаются” в одну). Причины возникновения и расположения четырех характерных точек более детально описаны в [16].

На рис. 1 представлены рассчитанные типичные зависимости сигнала АИСВ  $E$  (кривые 1) для прямоугольных импульсов подсветки и стробирования для двух случаев: длительность импульса стробирования (регистрации) меньше (рис. 1, *а*) и больше (рис. 1, *б*) импульса подсветки. Учтено, что величину сигнала  $E$  можно записать в виде [17]:

$$E = E_0 S_{об}^{-2} \exp(-2kS_{об}) \int L(t - 2S_{об}/c) G(t - \Delta t_{зад}) dt,$$

где  $E_0$  — константа, не зависящая от  $S_{об}$ ;  $k$  — показатель ослабления лазерного излучения в атмосфере;  $t$  — время;  $L$  и  $G$  — функции, описывающие временные зависимости интенсивности лазерной подсветки и чувствительности приемного блока (строб-импульса). Множитель  $E_{LG} = \int L(t - 2S_{об}/c) G(t - \Delta t_{зад}) dt$  представляет собой свертку функций  $L$  и  $G$  и обусловлен физическим принципом работы АИСВ. Его поведение на рис. 1 отражает кривая 2.

Из рис. 1 следует, что ПЭП можно условно представить в виде трапеции  $E_{LG}$ , форма которой искажена множителем  $S_{об}^{-2} \exp(-2kS_{об})$ . При этом сплошные вертикальные линии обозначают расстояния  $S_{нач-100\%}$ , пунктирные — расстояния  $S_{кон-100\%}$ . В соответствии с [16] при  $\Delta t_{лаз} > \Delta t_{ЭОП}$  (рис. 1, *а*)  $S_{зад} = S_{кон-100\%}$ , при  $\Delta t_{лаз} < \Delta t_{ЭОП}$  (рис. 1, *б*)  $S_{зад} = S_{нач-100\%}$ .

Таким образом, если длительность импульса подсветки меньше времени регистрации, то положение максимума ПЭП совпадает с дистанцией задержки  $S_{зад}$ , что позволяет прогнозировать область максимального сигнала. Важным фактором является и то, что при выполнении этого неравенства регистрируется 100 % энергии возвратившегося к системе после отражения импульса подсветки. Поэтому сигнал  $E$  на рис. 1, *б* превышает соответствующую величину для рис. 1, *а*. Далее рассматриваем только случай  $\Delta t_{лаз} < \Delta t_{ЭОП}$ .

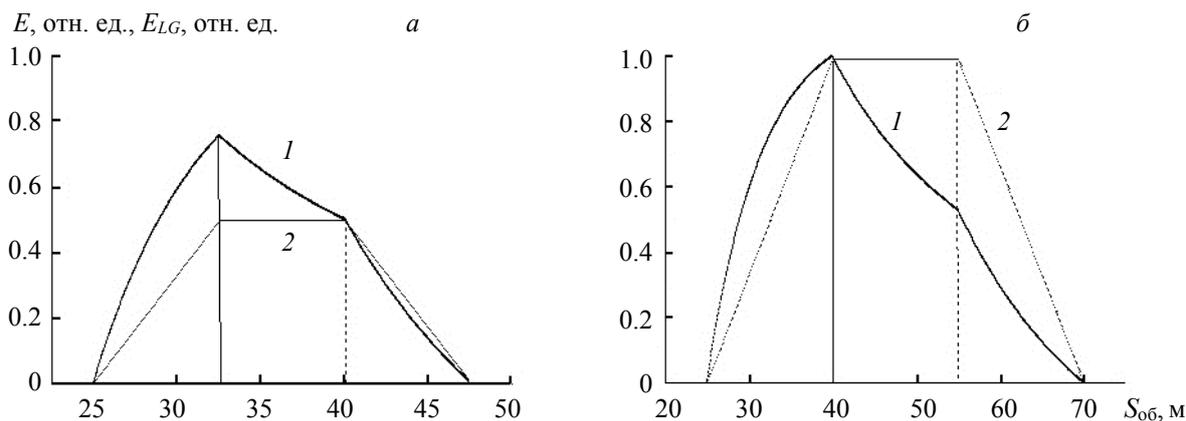


Рис. 1. Зависимости регистрируемого сигнала  $E$  (1) и множителя-свертки  $E_{LG}$  (2) от расстояния до объекта  $S_{об}$  в пределах зоны видимости;  $S_{зад} = 40$  м,  $\Delta t_{лаз} = 100$  нс,  $\Delta t_{ЭОП} = 50$  (*а*) и 200 нс (*б*)

**Результаты и их обсуждение.** При расчетах использованы параметры  $S_{зад} = 40$  м,  $\Delta t_{зад-x} = 0$ ,  $\Delta t_{ЭОП} = 2\Delta t_{лаз}$ . Предполагается, что строб-импульс приемного блока имеет прямоугольную форму. Форма импульса подсветки выбиралась либо прямоугольной, либо близкой к реальной (рис. 2).

Считается (см., например, [1]), что в АИСВ длительность лазерного импульса  $\Delta t_{лаз}$  должна быть меньше времени  $t_x$  его распространения на расстояние задержки  $S_{зад}$  и обратно. Обозначим соотношение указанных времен с помощью выражения  $m = t_x/\Delta t_{лаз}$ , которое устанавливает связь между пространственной длиной лазерного импульса  $S_{лаз} = c\Delta t_{лаз}/2$  и расстоянием задержки  $S_{зад}$ .

На рис. 3 приведен рассчитанный ПЭП для случаев реальных и прямоугольных импульсов подсветки при разных  $m$ . Расстояние  $S_{зад} = 40$  м обозначено вертикальной линией. Видно, что в случае прямоугольных импульсов подсветки и при  $\Delta t_{ЭОП} = 2\Delta t_{лаз}$  положение максимума сигнала  $S_{max}$  на ПЭП совпадает с дистанцией задержки при всех  $m$ . Это соответствует [16]. Однако при реальной форме импульса подсветки положение максимума сдвинуто к началу зоны видимости относительно дистанции задержки, причем сдвиг увеличивается при уменьшении  $m$ . Для характеристики сдвига введем величину  $\varepsilon = (S_{зад} - S_{max})/S_{зад}$ . В данном случае реализуются значения  $\varepsilon = 0.118$  (*а*), 0.042 (*б*), 0.022 (*в*),

0.015 (з) и 0.002 (д). В соответствии с [16] и рис. 3 выполняется соотношение  $S_{\text{зад}} - S_{\text{нач}} = c\Delta t_{\text{лаз}}/2$ . Для рис. 3, а  $S_{\text{зад}} - S_{\text{нач}} = 20$  м, а для рис. 3, д аналогичная разность значительно меньше: 4 м. Наблюдается корреляция  $S_{\text{зад}} - S_{\text{нач}}$  и  $\varepsilon$ . Таким образом, максимальный сдвиг (рис. 3, а) реализуется, если длина зоны видимости сравнима с расстоянием задержки.

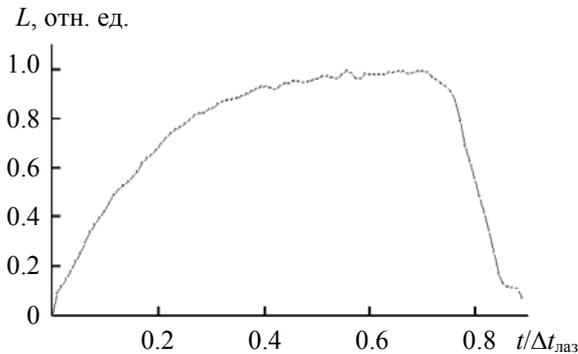


Рис. 2. Временная форма импульса лазерной подсветки  $L$ , соответствующая реализованной экспериментально

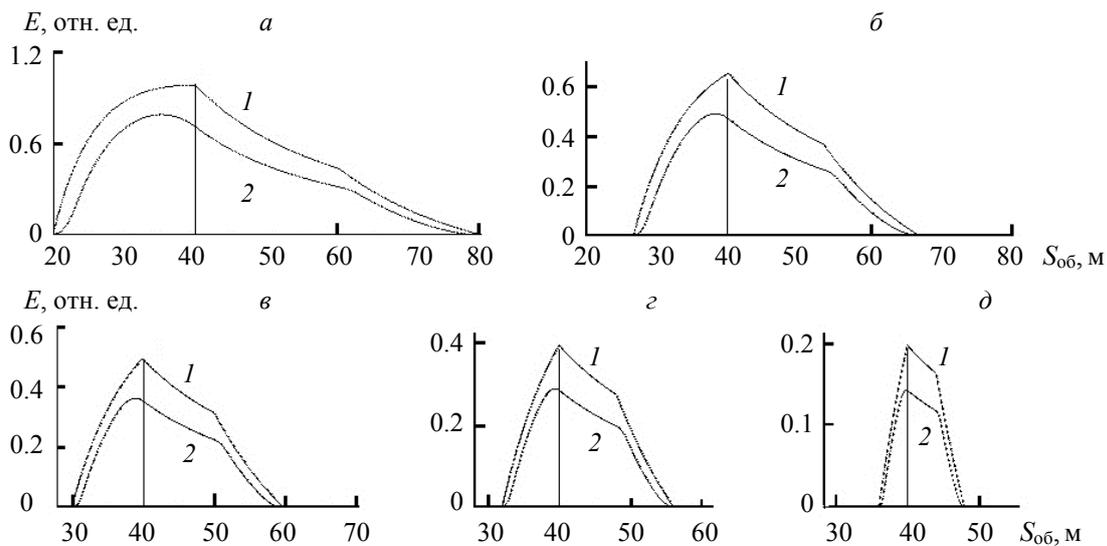


Рис. 3. Зависимость регистрируемого сигнала  $E$  от расстояния до объекта  $S_{\text{об}}$  в пределах зоны видимости;  $\Delta t_{\text{ЭОП}} = 2\Delta t_{\text{лаз}} = 266.6$  ( $m = 2$ ) (а),  $177.8$  ( $m = 3$ ) (б),  $133.4$  ( $m = 4$ ) (в),  $106.6$  ( $m = 5$ ) (г) и  $53.4$  нс ( $m = 10$ ) (д); форма импульса подсветки прямоугольная (1) и реальная (2)

Проведены расчеты зависимости расположения максимума отклика  $S_{\text{max}}$  для других форм импульса подсветки (треугольной и трапециевидной) для условий рис. 3, а. Наибольшее отклонение  $\varepsilon$  наблюдалось для асимметричных импульсов треугольной формы.

При экспериментальных исследованиях использовалась АИСВ, имеющая встроенный фрейм-граббер. В блоке лазерной подсветки объектов применялись полупроводниковые импульсные лазеры типа Л13. Основные параметры этих лазеров [19]: пиковая мощность излучения 320 Вт (средняя мощность 200 мВт); частота следования импульсов тока накачки 5.2 кГц, их длительность 120 нс; длина волны лазерного излучения 800—860 нм. Данный тип лазеров выбран исходя из условий максимальной средней мощности излучения при минимальных массогабаритных параметрах. Учитывалось, что рабочие спектральные диапазоны лазера и ЭОП должны перекрываться. В данной АИСВ

используется опорная (реперная) частота управляющих импульсов  $f_0 = 200$  МГц, что соответствует минимально возможному изменяемому интервалу времени  $\Delta t_0 = 5$  нс. Тогда минимально возможный измеряемый интервал расстояний (пространственный шаг)  $\Delta S_0 = c\Delta t_0/2 = 0.75$  м.

На рис. 4 приведены результаты экспериментального измерения ПЭП с помощью АИСВ и рассчитанные  $E$  при  $\Delta t_{\text{зад-х}} = 0$  и  $\Delta t_{\text{зад-х}} = -38$  нс. При измерениях и расчетах  $S_{\text{зад}} = 40$  м. Длительности импульса подсветки и строб-импульса:  $\Delta t_{\text{лаз}} = 106$  нс и  $\Delta t_{\text{ЭОП}} = 225$  нс. При измерениях пространственный шаг изменения расстояния до объекта (перемещался белый щит размером  $60 \times 60$  см) 1 м. Это соответствует погрешности  $\pm 0.5$  м при определении характерных расстояний (например, максимума). Кривую 1 можно условно классифицировать как квазитрапецевидную, поскольку при  $S_{\text{об}} \sim 52$  м “просматривается” изгиб, который может соответствовать характерному расстоянию  $S_{\text{кон-100\%}}$ . Для кривой 1  $S_{\text{max}} = 32$  м. Согласно [16], в случае прямоугольных импульсов подсветки  $S_{\text{max}} = S_{\text{нач-100\%}} = S_{\text{зад}} = 40$  м. Сдвиг расстояния  $S_{\text{max}}$  от  $S_{\text{зад}}$  в сторону меньших значений для реальной формы импульса согласуется с приведенными выше результатами расчетов. Кривая 2 представляет результат расчета сигнала  $E$  при  $\Delta t_{\text{зад-х}} = 0$ . Видно, что она смещена относительно кривой 1 в сторону больших  $S_{\text{об}}$ . Это обусловлено использованием параметра  $\Delta t_{\text{зад-х}} = 0$ . Сравнивая экспериментальные и теоретические значения  $S_{\text{нач}}$  и  $S_{\text{кон}}$ , с помощью выражений [16] найдем  $\Delta t_{\text{зад-х}} = -31.3$  нс. Знак “минус” можно объяснить тем, что для лазера значение  $\Delta t_{\text{зад-х}}$  превышает аналогичную величину для ЭОП. Кривая 3 рассчитана с учетом  $\Delta t_{\text{зад-х}} = -31.3$  нс. Наблюдается хорошее соответствие поведения кривых 1 и 3. Отметим, что для АИСВ в [16] получено  $\Delta t_{\text{зад-х}} = -13$  нс, в [20]  $\Delta t_{\text{зад-х}} = -100$  нс.

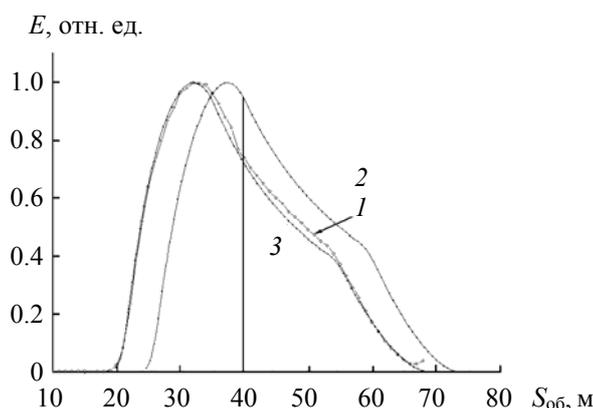


Рис. 4. Зависимость сигнала  $E$  от расстояния  $S_{\text{об}}$ ; экспериментальные измерения (1); расчет при  $\Delta t_{\text{зад-х}} = 0$  (2) и  $-31.3$  нс (3)

Результаты расчета и экспериментальные данные рис. 4 подтверждают, что при малых дистанциях наблюдения и малом параметре  $m$  (в данном случае  $\sim 2.5$ ) ПЭП превращается в асимметричную одногорбую кривую с максимумом, смещенным относительно  $S_{\text{зад}}$  в окрестность начальной точки зоны видимости. На практике это может проявляться в сужении области наилучшей видимости (максимальной яркости) по сравнению с зоной видимости. Хорошее согласие с экспериментом повышает степень доверия к предположениям, сделанным при расчетах. Оно также свидетельствует о том, что используемая в расчетах гипотеза о прямоугольной форме строб-импульсов ЭОП, по-видимому, справедлива.

**Заключение.** Численно и экспериментально исследованы особенности формирования пространственно-энергетических профилей сигнала активно-импульсных систем видения при малых дистанциях. Исследования выполнены для случая наблюдения, когда при фиксированном расстоянии задержки (положении зоны видимости)  $S_{\text{зад}}$  рассматривается зависимость величины регистрируемого сигнала от расстояния до объекта в пределах зоны видимости (пространственно-энергетический профиль). Рассмотрен случай длительностей импульса подсветки, меньших длительности регистрации. При расчетах форма импульса подсветки задавалась близкой к реальной, а временной профиль чувствительности фотоприемника выбирался прямоугольным. Результаты расчетов для реального профиля импульса сопоставляются с данными для прямоугольного профиля. Численные исследования

для реального импульса показывают, что в отличие от случая прямоугольного импульса положение максимума на зависимости сигнала от дальности не совпадает с дистанцией задержки. Это различие уменьшается с увеличением  $m$ . Получено хорошее согласие результатов расчетов с измеренной зависимостью регистрируемого сигнала от дальности, что оправдывает сделанные упрощающие предположения при разработке численной модели.

Авторы выражают благодарность Д. В. Шаброву за измерение формы импульса подсветки, а также И. Н. Пучковскому и С. С. Шавелю за помощь в проведении экспериментальных измерений.

- [1] **И. Л. Гейхман, В. Г. Волков.** Основы улучшения видимости в сложных условиях, Москва, ООО “Недра-Бизнесцентр” (1999)
- [2] **В. Г. Волков, Б. А. Случак.** Научно-технический журнал “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] **J. Busck, H. Heiselberg.** Proc. SPIE, **5412** (2004) 257—263
- [6] **S. Y. Chua, X. Wang, N. Guo, C. S. Tan, T. Y. Chai, G. L. Seet.** J. Eur. Opt. Soc.-Rapid, **11** (2016) 16015
- [7] **B. Goehler, P. Lutzmann.** Proc. SPIE, **7835** (2010) 1—12
- [8] **D. Lu, X. Wang, S. Fan, Y. He, Y. Zhou, Y. Liu.** Chin. Opt. Lett., **13** (2015) 081102
- [9] **X. Wang, Y. Li, Y. Zhou.** Opt. Express, **23** (2015) 7820
- [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] **M. Laurenzis, F. Christnacher.** Adv. Opt. Tech., **2**, N 5-6 (2013) 397—405
- [13] **В. А. 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. A. Gorobets, V. V. Kabanov, V. P. Kabashnikov, B. F. Kuntsevich, N. S. Metelskaya, D. V. Shabrov.** J. Appl. Spectr., **81** (2014) 279—287]
- [14] **M. Laurenzis, F. Christnacher, D Monnin.** Opt. Lett., **32**, N 21 (2007) 3146—3148
- [15] **X. Wang, Y. Li, Y. Zhou.** Appl. Opt., **52**, N 30 (2013) 7399—7046
- [16] **В. А. Горобец, В. В. Кабанов, В. П. Кабашников, Б. Ф. Кунцевич, Н. С. Метельская, Д. В. Шабров.** Журн. прикл. спектр., **82**, № 1 (2015) 69—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] **X. Wang, Y. Zhou, Y. Liu.** Chin. Opt. Lett., **10** (2012) 101101
- [18] **В. В. Капустин, А. К. Мовчан, Е. В. Зайцева, М. И. Курячий.** Транспортные системы и технологии, **4**, № 1 (2018) 68—83
- [19] <http://www.inject-laser.ru>
- [20] **Е. В. Зайцева.** Оценка чувствительности и разрешающей способности телевизионных датчиков на ПЗС-матрицах, дис. ... канд. тех. наук, Томский государственный университет систем управления и радиотехники (2015) 72