

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ЗОНЫ ВИДИМОСТИ АКТИВНО-ИМПУЛЬСНЫМИ СИСТЕМАМИ ВИДЕНИЯ НА НАКЛОННЫХ ТРАССАХ ПРИ ДИФФУЗНОМ ОТРАЖЕНИИ

Б. Ф. Кунцевич^{1*}, В. П. Кабашников¹, Д. В. Шабров²

УДК 535.312;535.516

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

² Институт физики НАН Беларуси, Минск, Беларусь

(Поступила 29 июня 2021)

Численно установлено, что при регистрации активно-импульсными системами видения сигналов от диффузно отражающей подстилающей поверхности вдоль наклонных трасс можно условно выделить участок малых расстояний задержек, ограниченных значением $L_{\text{зад-гр}}$, где пространственно-энергетический профиль регистрируемого сигнала имеет вид выпуклых асимметричных кривых с максимумом, смещенным к началу зоны видимости. Значение $L_{\text{зад-гр}}$ зависит от длительностей импульсов подсветки и стробирования. Для кооперированного объекта (снабженного ретрорефлекторами) $L_{\text{зад-гр}}$ совпадает со значением, ранее установленным для горизонтальных трасс. Ширина зоны видимости для кооперированного и диффузного объектов возрастает с увеличением расстояния задержки, стремясь к некоторому предельному значению, зависящему от длительностей импульсов подсветки и стробирования. При наблюдении на наклонных трассах угол видимости в вертикальной плоскости определяется длительностями импульсов подсветки и стробирования, а также расстоянием задержки и высотой установки системы видения.

Ключевые слова: активно-импульсная система видения, закономерности формирования пространственно-энергетического профиля, малые дистанции наблюдения, положение максимума сигнала, угол видимости системы.

It is established numerically that when active-pulse vision system registers signals from a diffusely reflecting underlying surface along inclined lines of sight, it is possible to select an area of small delay distances limited by the value $L_{\text{ad-gr}}$, where the spatial-energy profile of the recorded signal has the form of convex asymmetric curve with a maximum shifted to the beginning of the visibility zone. The value of $L_{\text{ad-gr}}$ depends on the duration of the illumination and strobing pulses. For a co-operated object (equipped with retroreflectors), $L_{\text{ad-gr}}$ coincides with the value previously set for horizontal observation lines. The width of the visibility zone for the cooperative and diffuse objects increases with the increase in the delay distance, tending to a certain limit value, depending on the duration of the illumination and strobing pulses. When observing on inclined lines of sight, the visibility angle in the vertical plane is determined by the duration of the illumination and strobing pulses, as well as the delay distance and the height of the vision system installation.

Keywords: active-pulse vision system, regularities of formation of the spatial-energy profile, small observation distances, the position of the signal maximum.

Введение. В настоящее время для решения многих практических задач используются активно-импульсные системы видения (АИСВ) (см., например, [1—4]). Принцип их действия основан на импульсно-периодической подсветке объектов наблюдения короткими лазерными импульсами с типич-

REGULARITIES OF THE FORMATION OF THE VISIBILITY ZONE BY ACTIVE-PULSE VISION SYSTEMS ON INCLINED LINES OF SIGHT WITH DIFFUSE REFLECTION

B. F. Kuntsevich^{1*}, V. P. Kabashnikov¹, D. V. Shabrov² (¹ SSPA “Optics, Optoelectronics, and Laser Technology”, Minsk, Belarus; e-mail: bkun@ifanbel.bas-net.by; ² B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus)

ной длительностью $\Delta t_{\text{лаз}}$ от единиц наносекунд до десятков микросекунд. Синхронно с лазерными импульсами, но с некоторой задержкой $\Delta t_{\text{зад}}$, включается приемный блок (обычно электронно-оптический преобразователь (ЭОП)) также на короткое время $\Delta t_{\text{ЭОП}}$, сравнимое с $\Delta t_{\text{лаз}}$. Наличие временной задержки $\Delta t_{\text{зад}}$ позволяет не регистрировать сильный сигнал обратного рассеяния, например, от слоя тумана, расположенного между АИСВ и объектом. Указанные системы позволяют видеть объекты в сравнительно узкой полосе пространства (зоне видимости) длиной $\Delta L_{\text{ЗВ}} = c(\Delta t_{\text{лаз}} + \Delta t_{\text{ЭОП}})/2$, где c — скорость света. Сведения о расстоянии задержки $L_{\text{зад}} = c\Delta t_{\text{зад}}/2$ и $\Delta L_{\text{ЗВ}}$ позволяют оценить дистанцию до объектов, расположенных в зоне видимости [1]. Первоначально АИСВ предназначались для наблюдения в условиях пониженной прозрачности атмосферы (дымка, туман, дождь и т. д.) [5]. Однако к настоящему времени область применения таких систем значительно расширилась. В частности, АИСВ используются для высокоточного определения расстояний до объектов и для построения трехмерных изображений [6—10]. В [6—10] в приемном блоке в качестве быстродействующего затвора и усилителя применяется ЭОП. Для удешевления и уменьшения массогабаритных параметров в [11, 12] предложено вместо ЭОП использовать ПЗС-фотоприемник со строчным переносом и специальным режимом управления.

Два способа наблюдения объектов. Для дальнейшего рассмотрения целесообразно условно выделить два способа наблюдения объектов с помощью АИСВ [8]. Известно [7], что пространственно-энергетический профиль (ПЭП), т. е. зависимость величины E регистрируемого АИСВ сигнала (энергии, яркости и т. д.) от длины луча до объекта (расстояния) L , можно представить в виде

$$E = E_c E_{\text{пр}} R, \quad (1)$$

где E_c — постоянный множитель (учитывает угол подсветки и поле зрения приемника, коэффициент отражения объекта, оптические характеристики приемника и блока подсветки и др.), который не зависит от расстояния L ; $E_{\text{пр}} = \exp(-2\sigma L)/L^2$ назовем пространственным множителем, учитывающим ослабление излучения при распространении его в атмосфере до объекта и обратно (σ — показатель ослабления), а также расходимость луча подсветки; $R = \int P(t - 2L/c)G(t - \Delta t_{\text{зад}})dt$ — множитель-свертка, который представляет собой свертку двух функций: $P(t)$ — мощность излучения подсветки, $G(t)$ — функция, описывающая временную зависимость чувствительности приемного блока (ЭОП) (t — время, c — скорость света). Этот множитель обусловлен принципом действия АИСВ.

При первом способе наблюдения объект находится на фиксированном расстоянии $L_{\text{об}}$ от системы. В этом случае $E_{\text{пр}} = \exp(-2\sigma L_{\text{об}})/L_{\text{об}}^2 = \text{const}$. При изменении расстояния задержки $L_{\text{зад}}$ зона видимости, например, приближается к объекту, перемещается в его окрестности и затем удаляется от него. При этом форма ПЭП определяется множителем R и имеет форму треугольника или трапеции [13].

При втором способе наблюдения фиксируется расположение зоны видимости относительно АИСВ путем выбора $L_{\text{зад}}$. В этом случае можно либо наблюдать совокупность объектов, которые расположены на разных расстояниях в пределах зоны видимости, либо следить за передвижением объекта в зоне видимости [10]. Сюда также можно отнести наблюдение на наклонных трассах [14], когда АИСВ расположена на некоторой высоте от поверхности земли. Соответствующие этому способу наблюдения аналитические выражения для характерных расстояний зоны видимости приведены в [10, 14]. Разработан также ряд других методов [6, 7, 9], позволяющих при втором способе наблюдения с высокой точностью определять расстояния до объектов и строить трехмерные изображения. Обратим внимание на то, что при втором способе наблюдения ПЭП определяется совместным влиянием множителей $E_{\text{пр}}$ и R и при типичных дистанциях наблюдения имеет форму квазитрапеции или квазитреугольника [10, 14].

Таким образом, к настоящему времени для обоих способов наблюдения изучены основные закономерности формирования ПЭП регистрируемого сигнала и их знание использовано для решения ряда практических задач, в частности, определения расстояний до объектов. В то же время ряд вопросов требуют дальнейшего изучения. Так, в [14] были рассмотрены закономерности формирования ПЭП принимаемого сигнала и получены аналитические выражения для характерных расстояний зоны видимости при наблюдении на наклонных трассах, однако только для одного из частных случаев, который соответствует исследованию кооперированного объекта [15], т. е. снабженного ретрорефлектором. При прочих равных условиях отраженный от ретрорефлектора в строго обратном направлении сигнал является максимальным, что повышает дальность действия системы видения. На практике часто реализуется случай диффузного отражения [16, 17]. В связи с этим в настоящей работе изучены закономерности формирования ПЭП зоны видимости для случая, когда объект наблюде-

ния следует моделировать горизонтальным диффузным отражателем. Кроме того, недавно было установлено [18—20], что на малых дистанциях (~60 м и менее) при горизонтальном наблюдении ПЭП обладает рядом особенностей. Этот вопрос особо актуален для наклонных трасс, когда АИСВ устанавливается на некоторой высоте над уровнем земли, а удаление зоны видимости от АИСВ в горизонтальном направлении сравнительно мало (условно не превышает ~60 м; диспетчерский контроль железнодорожных путей, охранное видеонаблюдение и др.). Подобная ситуация имела место при испытаниях АИСВ, установленной на большегрузном карьерном самосвале БелАЗ на высоте ~5.7 м [14]. Поэтому в данной работе дополнительно исследованы закономерности формирования ПЭП на малых дистанциях.

Диффузное отражение. Согласно [17], можно выделить два предельных случая отражения: зеркальное и диффузное. При зеркальном отражении угол отражения светового луча равен углу падения. Диффузное отражение присуще матовым (шероховатым) поверхностям, размер шероховатостей которых настолько велик, что падающий луч рассеивается равномерно во все стороны. Далее рассматривается особый случай диффузного отражения, описываемый законом Ламберта, когда интенсивность отраженного света I_d не зависит от углового положения наблюдателя (ортотропное отражение) и пропорциональна косинусу угла α между направлением на точечный источник света и нормалью к поверхности [16, 17]:

$$I_d = k_d I_0 \cos \alpha, \quad (2)$$

где I_0 — интенсивность падающего света; k_d — коэффициент диффузного отражения, учитывающий свойства материала отражающей поверхности, который находится в диапазоне 0—1. Ортотропное отражение является идеализацией реального отражения, однако в силу своей простоты часто используется при моделировании. Диффузное отражение характерно, например, для гипса, мела, песка, камней, бумаги, пластика и др. [16, 17].

Закономерности формирования зоны видимости АИСВ на наклонных трассах при диффузном отражении. Пусть АИСВ установлена на высоте H (рис. 1) относительно поверхности земли (точка O). Известно [14], что ПЭП зоны видимости в случае кооперированного объекта можно характеризовать с помощью четырех элементарных лучей (характерных расстояний) длинами $L_{\text{нач}}$, $L_{\text{нач-100\%}}$, $L_{\text{кон-100\%}}$ и $L_{\text{кон}}$, направленных от АИСВ в область наблюдения на поверхности земли. Элементарные лучи $L_{\text{нач}}$ и $L_{\text{кон}}$ соответствуют начальной (ближней) и конечной (дальней) точкам зоны видимости, а промежуточные характерные лучи $L_{\text{нач-100\%}}$ и $L_{\text{кон-100\%}}$ — регистрации сигнала либо в течение 100 % интервала времени открытого состояния приемного блока (при $\Delta t_{\text{лаз}} > \Delta t_{\text{эоп}}$), либо в течение 100 % длительности импульса подсветки (при $\Delta t_{\text{лаз}} < \Delta t_{\text{эоп}}$). Элементарным лучам однозначно соответствуют расстояния $S_{\text{нач}}$, $S_{\text{нач-100\%}}$, $S_{\text{кон-100\%}}$ и $S_{\text{кон}}$, отсчитываемые вдоль горизонтальной поверхности. Из геометрии следует, что $S = (L^2 - h^2)^{1/2}$, где h — длина отрезка OH (высота). Полученные в [14] выражения для этих характерных длин приведены в табл. 1. При этом в соответствии с экспери-

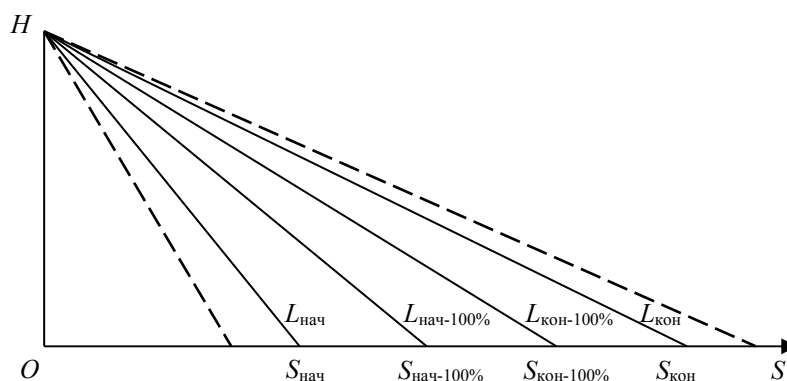


Рис. 1. Характерные элементарные лучи (сплошные линии) $L_{\text{нач}}$, $L_{\text{нач-100\%}}$, $L_{\text{кон-100\%}}$ и $L_{\text{кон}}$ лазерного импульса подсветки и соответствующие им расстояния $S_{\text{нач}}$, $S_{\text{нач-100\%}}$, $S_{\text{кон-100\%}}$ и $S_{\text{кон}}$ на поверхности земли при наблюдении на наклонной трассе; штриховые линии определяют угол, соответствующий световому пучку лазерной подсветки и углу зрения приемной системы (для простоты полагаются равными)

ментальными результатами предполагалось $\Delta t_{\text{зад}} = \Delta t_{\text{зад-упр}} + \Delta t_{\text{зад-х}}$, где $\Delta t_{\text{зад-упр}}$ — известная составляющая задержки, определяемая управляющими импульсами, а значение $\Delta t_{\text{зад-х}}$ обычно неизвестно и технически трудно измеримо. Способ нахождения $\Delta t_{\text{зад-х}}$ приведен в [14]. Отметим, что в данном случае $L_{\text{зад}} = c\Delta t_{\text{зад-упр}}/2$. Далее будет показано, что эти характерные длины (или соответствующие им точки на горизонтальной поверхности) при определенных условиях применимы и в случае диффузного отражения.

На рис. 2 представлены результаты расчета зависимостей E_0 , E и R от длины L для разных расстояний задержек $L_{\text{зад}}$, где E_0 — ПЭП для случая наблюдения кооперированного объекта, который ранее был изучен в [14]; $E = E_0 \cos \alpha$ — ПЭП при диффузном отражении. Из рис. 1 следует $\cos \alpha = h/L$. Здесь и далее для простоты принято $\Delta t_{\text{зад-х}} = 0$. На примере рис. 2, з, где кривые E_0 , E и R практически “сливаются”, поясним расположение характерных расстояний (длин) $L_{\text{нач}}$, $L_{\text{нач-100\%}}$, $L_{\text{кон-100\%}}$ и $L_{\text{кон}}$. Из рис. 2 видно, что в соответствии с табл. 1 зависимости $R(L)$ (кривые 3) имеют форму трапеции (при $\Delta t_{\text{лаз}} \neq \Delta t_{\text{эоп}}$) или треугольника (рис. 2, е; $\Delta t_{\text{лаз}} = \Delta t_{\text{эоп}}$). Следует отметить, что на рис. 2 для всех трех кривых значения $L_{\text{нач}}$ и $L_{\text{кон}}$ совпадают с вычисленными на основе формул табл. 1.

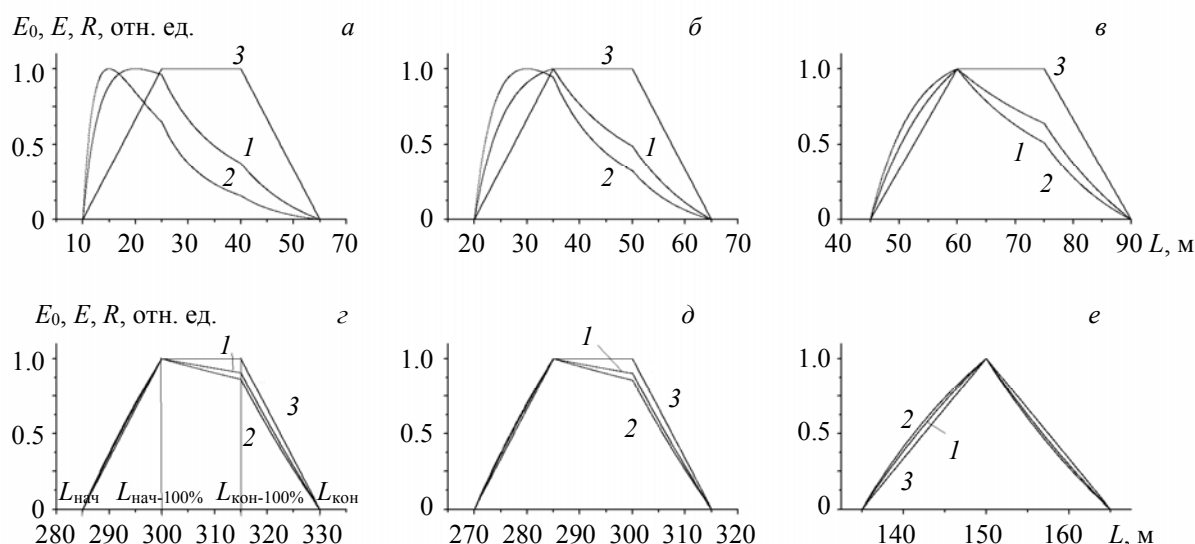


Рис. 2. Пространственно-энергетические профили регистрируемого сигнала для кооперированного объекта E_0 (1), объекта с диффузным отражением E (2) и профиль множителя-свертки R (3) при $L_{\text{зад}} = 25$ (а), 35 (б), 60 (в), 300 (з, д) и 150 м (е); $\Delta t_{\text{лаз}} = 100$ (а—з), 200 (д) и 100 нс (е); $\Delta t_{\text{эоп}} = 100$ нс (а—е)

Т а б л и ц а 1. Формулы для расчета характерных расстояний и длин участков

Времена	$\Delta t_{\text{лаз}} > \Delta t_{\text{эоп}}$	$\Delta t_{\text{лаз}} < \Delta t_{\text{эоп}}$	$\Delta t_{\text{лаз}} = \Delta t_{\text{эоп}}$
Характерные расстояния (дистанции)			
$L_{\text{нач}}$	$L_{\text{зад}} - c(\Delta t_{\text{лаз}} - \Delta t_{\text{зад-х}})/2$	$L_{\text{зад}} - c(\Delta t_{\text{лаз}} - \Delta t_{\text{зад-х}})/2$	$L_{\text{зад}} - c(\Delta t_{\text{лаз}} - \Delta t_{\text{зад-х}})/2$
$L_{\text{нач-100\%}}$	$L_{\text{зад}} - c(\Delta t_{\text{лаз}} - \Delta t_{\text{эоп}} - \Delta t_{\text{зад-х}})/2$	$L_{\text{зад}} + c\Delta t_{\text{зад-х}}/2$	$L_{\text{макс}} = L_{\text{нач-100\%}} = L_{\text{кон-100\%}} =$
$L_{\text{кон-100\%}}$	$L_{\text{зад}} + c\Delta t_{\text{зад-х}}/2$	$L_{\text{зад}} + c(\Delta t_{\text{эоп}} - \Delta t_{\text{лаз}} + \Delta t_{\text{зад-х}})/2$	$= L_{\text{зад}} + c\Delta t_{\text{зад-х}}/2$
$L_{\text{кон}}$	$L_{\text{зад}} + c(\Delta t_{\text{эоп}} + \Delta t_{\text{зад-х}})/2$	$L_{\text{зад}} + c(\Delta t_{\text{эоп}} + \Delta t_{\text{зад-х}})/2$	$L_{\text{зад}} + c(\Delta t_{\text{эоп}} + \Delta t_{\text{зад-х}})/2$
Длины характерных участков			
$\Delta L_{\text{ЗВ}}$	$c(\Delta t_{\text{лаз}} + \Delta t_{\text{эоп}})/2$	$c(\Delta t_{\text{лаз}} + \Delta t_{\text{эоп}})/2$	$c(\Delta t_{\text{лаз}} + \Delta t_{\text{эоп}})/2$
$\Delta L_{100\%}$	$c(\Delta t_{\text{лаз}} - \Delta t_{\text{эоп}})/2$	$c(\Delta t_{\text{эоп}} - \Delta t_{\text{лаз}})/2$	—
$\Delta L_{\text{фр}}$	$c\Delta t_{\text{эоп}}/2$	$c\Delta t_{\text{лаз}}/2$	$c\Delta t_{\text{лаз}}/2$
$\Delta L_{\text{сп}}$	$c\Delta t_{\text{эоп}}/2$	$c\Delta t_{\text{лаз}}/2$	$c\Delta t_{\text{эоп}}/2$

П р и м е ч а н и е. $\Delta L_{\text{ЗВ}} = L_{\text{кон}} - L_{\text{нач}}$, $\Delta L_{100\%} = L_{\text{кон-100\%}} - L_{\text{нач-100\%}}$, $\Delta L_{\text{фр}} = L_{\text{нач-100\%}} - L_{\text{нач}}$, $\Delta L_{\text{сп}} = L_{\text{кон}} - L_{\text{кон-100\%}}$.

На примере рис. 2, *a—г*, которые построены для $\Delta t_{\text{лаз}} = 100$ нс и $\Delta t_{\text{ЭОП}} = 200$ нс, рассмотрим отличия в поведении кривых E_0 , E и R . При сравнительно малом расстоянии задержки $L_{\text{зад}}$ (рис. 2, *a*) зависимости E_0 и E имеют вид выпуклых асимметричных кривых с одним максимумом. Расстояния $L_{\text{м0}}$ и $L_{\text{м}}$, соответствующие этим максимумам, смещены к точке $L_{\text{нач}}$ и различаются между собой. По мере увеличения $L_{\text{зад}}$ значения $L_{\text{м0}}$ и $L_{\text{м}}$ приближаются к точке $L_{\text{нач-100\%}}$. Для рис. 2, *б* достигается ситуация $L_{\text{м0}} = L_{\text{нач-100\%}}$. При некотором $L_{\text{зад}}$ (рис. 2, *в*) максимум $L_{\text{м}}$ также совпадает с характерным расстоянием $L_{\text{нач-100\%}}$. Можно считать, что при этом обе кривые E_0 и E имеют форму квазитрапеции, поскольку на них дополнительно проявляется характерное расстояние, соответствующее значению $L_{\text{кон-100\%}}$. При дальнейшем увеличении $L_{\text{зад}}$ (рис. 2, *г*) все три кривые на участке $L_{\text{нач}}-L_{\text{нач-100\%}}$ практически “сливаются”, а на участке $L_{\text{нач-100\%}}-L_{\text{кон}}$ кривые 1 и 2 сравнительно медленно приближаются к кривой 3. Из расчетов следует, что при $L_{\text{зад}} = 1000$ м три кривые практически совпадают в пределах всей длины зоны видимости и форма кривых 1 и 2 соответствует трапеции.

Для сравнения на рис. 2, *д* приведены зависимости E_0 , E и R для длительностей $\Delta t_{\text{лаз}} = 200$ нс и $\Delta t_{\text{ЭОП}} = 100$ нс при $L_{\text{зад}} = 300$ м. Качественно поведение трех кривых на рис. 2, *г* и *д* схожее. Различие состоит в следующем. При $\Delta t_{\text{лаз}} < \Delta t_{\text{ЭОП}}$ (рис. 2, *г*) $L_{\text{м0}} = L_{\text{м}} = L_{\text{нач-100\%}} = L_{\text{зад}}$ (соответствует табл. 1). В случае рис. 2, *д* ($\Delta t_{\text{лаз}} > \Delta t_{\text{ЭОП}}$) $L_{\text{м0}} = L_{\text{м}} = L_{\text{нач-100\%}} = L_{\text{зад}} - c(\Delta t_{\text{лаз}} - \Delta t_{\text{ЭОП}})/2$ (табл. 1). На рис. 2, *е* форма ПЭП ($\Delta t_{\text{лаз}} = \Delta t_{\text{ЭОП}}$) практически треугольная и достигается уже при $L_{\text{зад}} = 150$ м (три кривые практически совпадают). При этом $L_{\text{м0}} = L_{\text{м}} = L_{\text{зад}}$ (табл. 1). Для параметров, соответствующих рис. 2, *д* и *е*, при малых $L_{\text{зад}}$ наблюдаются закономерности, аналогичные рис. 2, *a—в*.

ПЭП в виде выпуклой асимметричной кривой, максимум которой при сравнительно малых $L_{\text{зад}}$ сдвинут к началу зоны видимости, наблюдался недавно в [18, 20]. Аналогичное по физическому смыслу поведение ПЭП обнаружено в [19] (горизонтальная трасса). При этом $L_{\text{зад}}$ задавалось фиксированным (40 м), а изменялись длительности импульсов $\Delta t_{\text{ЭОП}} = \Delta t_{\text{лаз}}$. Выпуклая асимметричная форма ПЭП имела место при $l_{\text{лаз}} = c\Delta t_{\text{лаз}}/2$ (пространственная полудлина импульса подсветки), сравнимом с $L_{\text{зад}}$. При выполнении неравенства $l_{\text{лаз}} \ll L_{\text{зад}}$ ПЭП приобретал форму трапеции, когда характерные расстояния зоны видимости подчиняются аналитическим выражениям [10].

В недавно выполненной для второго случая наблюдения (горизонтальная трасса) работе [20] показано, что в зависимости от расстояния задержки $L_{\text{зад}}$ можно выделить три интервала дистанций, в пределах которых расстояние, соответствующее максимуму ПЭП, подчиняется разным закономерностям. Третий интервал дистанций реализуется при выполнении условия $L_{\text{зад}} > l_{\text{лаз}} + l$, где $l_{\text{лаз}} = c\Delta t_{\text{лаз}}/2$, $l = \min(l_{\text{лаз}}, l_{\text{ЭОП}})$, $l_{\text{ЭОП}} = c\Delta t_{\text{ЭОП}}/2$. В нашем случае (рис. 2, *a—г*) $l_{\text{лаз}} = 15$ м; $l_{\text{ЭОП}} = 30$ м; $l = 15$ м, $l_{\text{лаз}} + l = 30$ м. Поэтому третьему интервалу соответствуют рис. 2, *б—г*. В соответствии с [10, 20] для этого интервала при $l_{\text{лаз}} < l_{\text{ЭОП}}$ имеет место $L_{\text{м0}} = L_{\text{зад}} = L_{\text{нач-100\%}}$ (см. табл. 1). Данный вывод действительно справедлив для кривой 1. При диффузном отражении (кривая 2) для рис. 2, *б* это условие еще не выполняется, но уже справедливо для рис. 2, *в* и *г*, т. е. начало третьего интервала смещается в область больших $L_{\text{зад}}$. Для второго интервала дистанций характерно выполнение неравенства $l_{\text{лаз}} \leq L_{\text{зад}} \leq l_{\text{лаз}} + l$. При этом максимуму сигнала соответствует расстояние $L_{\text{м0}} = 2(L_{\text{зад}} - l_{\text{лаз}})$ [20]. Рис. 2, *a* следует отнести ко второму интервалу дистанций. Анализ показывает, что для него для кривой 1 справедливо выражение $L_{\text{м0}} = 2(L_{\text{зад}} - l_{\text{лаз}})$. Диффузный характер отражения приводит к тому, что максимум кривой 2 смещен относительно максимума кривой 1 в область меньших значений L . На втором интервале дистанций задержек увеличение расстояний, соответствующих максимуму ПЭП, с ростом $L_{\text{зад}}$ обусловлено двумя механизмами [20]: 1) перемещением зоны видимости, 2) смещением $L_{\text{м0}}$ и $L_{\text{м}}$ в пределах зоны видимости от точки $L_{\text{нач}}$ к точке $L_{\text{нач-100\%}}$. Первый интервал дистанций ($0 \leq L_{\text{зад}} < l_{\text{лаз}}$) здесь не рассматривается по следующей причине. Из рис. 1 следует $L_{\text{нач}} \geq h$, из табл. 1 $L_{\text{нач}} = L_{\text{зад}} - c\Delta t_{\text{лаз}}/2$ или минимальное допустимое значение $L_{\text{зад}}^{\text{мин}} = h + c\Delta t_{\text{лаз}}/2$. Например, для рис. 2, *a—г* $L_{\text{зад}}^{\text{мин}} \approx 21$ м. Однако при этом $l_{\text{лаз}} = 15$ м.

Результаты на рис. 2 можно обобщить следующим образом. Множитель-свертка R в выражении (1) независимо от расстояния задержки $L_{\text{зад}}$ имеет форму трапеции (при $\Delta t_{\text{ЭОП}} \neq \Delta t_{\text{лаз}}$) или треугольника ($\Delta t_{\text{ЭОП}} = \Delta t_{\text{лаз}}$). Для его описания можно использовать четыре ($\Delta t_{\text{ЭОП}} \neq \Delta t_{\text{лаз}}$) или три ($\Delta t_{\text{ЭОП}} = \Delta t_{\text{лаз}}$) характерных расстояния, аналитические выражения для которых приведены в [10, 14]. При экспериментальных исследованиях обычно регистрируется ПЭП E , описываемый выражением (1). Вследствие наличия пространственного множителя $E_{\text{пр}}$ формы зависимостей E и E_0 могут сильно отличаться от R . При наблюдении на горизонтальных и наклонных трассах (кривые 1 и 2), согласно [20], можно выделить третий интервал дистанций задержек ($L_{\text{зад}} > l_{\text{лаз}} + l$), в пределах которых для E и E_0 справедливы аналитические выражения из [10, 14]. Началу третьего интервала, например для E_0 ,

соответствует рис. 2, б, когда максимум кривой I совпадает с точкой $L_{\text{нач-100\%}}$. В начале этого интервала ПЭП имеет форму квазитрапеции или квазиреугольника, а при значительном увеличении расстояния задержки практически приобретает форму трапеции или треугольника. В пределах второго интервала задержек ($L_{\text{лаз}} \leq L_{\text{зад}} \leq L_{\text{лаз}} + l$) на горизонтальных и наклонных трассах ПЭП имеет вид выпуклой асимметричной кривой, максимум которой смещен к началу зоны видимости. В литературе часто указано (см., например, [6, 7]), что форма ПЭП является либо трапецевидной ($\Delta t_{\text{ЭОП}} \neq \Delta t_{\text{лаз}}$), либо треугольной ($\Delta t_{\text{ЭОП}} = \Delta t_{\text{лаз}}$). Из полученных выше результатов следует, что это справедливо только при определенном соотношении между $L_{\text{лаз}}$, l и $L_{\text{зад}}$.

Абсолютные значения E_0 , E и R при изменении параметров могут сильно различаться (на порядок и более). Поэтому на рис. 2 для наглядности они нормированы на максимальные значения. Для демонстрации влияния расстояния задержки при разных длительностях $\Delta t_{\text{ЭОП}}$ и $\Delta t_{\text{лаз}}$ на соотношение сигналов при диффузном и кооперированном характере отражения на рис. 3 приведены зависимости величины $m = E_m/E_{m0}$ от $L_{\text{зад}}$. Отметим, что в соответствии с табл. 1 $L_{\text{нач}} = L_{\text{зад}} - c\Delta t_{\text{лаз}}/2$. Кроме того, из рис. 1 следует $L_{\text{нач}} \geq h$. С учетом этого получается, что для кривой 1 минимальное $L_{\text{зад}} = 13.5$ м, а для кривых 2 и 3 $L_{\text{зад}} = 21$ м. Как и следовало ожидать, наличие множителя $\cos \alpha = h/L$ при диффузном отражении приводит к тому, что $m < 1$ для всех трех кривых. Кроме того, $\cos \alpha$ уменьшается при увеличении $L_{\text{зад}}$. Из рис. 3 видно, что величина m сравнительно быстро уменьшается на начальном участке и достигает $m \approx 0.1$ уже при $L_{\text{зад}} \approx 60$ м. Из рис. 3 и дополнительных расчетов следует, что при дальнейшем увеличении $L_{\text{зад}}$ кривые практически “сливаются” и значение m асимптотически приближается к нулю.

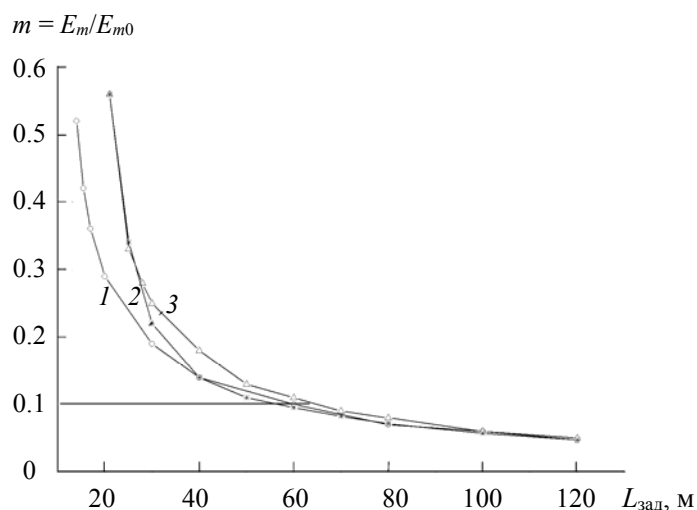


Рис. 3. Зависимости отношения максимумов ПЭП от расстояния задержки для диффузного и кооперированного объектов при $\Delta t_{\text{лаз}} = 50$ нс и $\Delta t_{\text{ЭОП}} = 100$ нс (1), $\Delta t_{\text{лаз}} = 100$ нс и $\Delta t_{\text{ЭОП}} = 200$ нс (2), $\Delta t_{\text{лаз}} = 100$ нс и $\Delta t_{\text{ЭОП}} = 50$ нс (3)

С практической точки зрения при проведении наблюдений важен такой параметр, как длина зоны видимости $\Delta L_{\text{ЗВ}} = L_{\text{кон}} - L_{\text{нач}} = c(\Delta t_{\text{лаз}} + \Delta t_{\text{ЭОП}})/2$ (табл. 1). В данном случае $\Delta L_{\text{ЗВ}}$ соответствует длине зоны видимости по основанию ПЭП и однозначно определяется длительностями $\Delta t_{\text{лаз}}$ и $\Delta t_{\text{ЭОП}}$. Однако из рис. 2 видно, что в зависимости от расстояния задержки $L_{\text{зад}}$ при фиксированных $\Delta t_{\text{лаз}}$ и $\Delta t_{\text{ЭОП}}$ ПЭП может сильно видоизменяться, приобретая ярко выраженный асимметричный вид (рис. 2, а—в). При этом фронт обычно является сравнительно крутым, а спад более пологим. Наблюдается также некоторое различие в поведении кривых E_0 и E . Такая асимметрия ПЭП на малых дистанциях ведет к уменьшению наблюдаемой на экране видеомонитора длины зоны видимости. Согласно [21], современные ЭОП имеют встроенную электронную функцию автоматической регулировки яркости (АРЯ). Упрощенно роль АРЯ заключается в поддержании полного тока люминесцентного экрана ЭОП на уровне, не превышающем заданного значения. Это эквивалентно тому, что наблюдаемая на экране зона видимости несколько уменьшена по сравнению с теоретическим значением $\Delta L_{\text{ЗВ}}$. Поэтому представляется целесообразным построить, аналогично [20], зависимости длины зоны видимости

на полувысоте $\Delta L_{ЗВ-0.5}$ от $L_{зад}$ при изменении основных параметров (рис. 4). Поведение зависимостей на рис. 4, а, б схожее. При малых $L_{зад}$ ПЭП обладает сравнительно узким пиком на полувысоте, сильно смещенным в окрестность точки $L_{нач}$ (аналогично рис. 2, а). С возрастанием $L_{зад}$ ширина пика на полувысоте увеличивается и он удаляется от точки $L_{нач}$ (по аналогии с рис. 2, б). При дальнейшем возрастании $L_{зад}$ происходят взаимное сближение и замедление роста кривых $\Delta L_{ЗВ-0.5}$. Их значения асимптотически приближаются к ≈ 15 м, что соответствует ширине кривой R на полувысоте для рис. 4, а, б. В данном предельном случае, аналогично рис. 2, з, все три кривые “сливаются” в одну. В обоих случаях кривая 1 расположена выше кривой 2, другими словами, диффузное отражение приводит к уменьшению $\Delta L_{ЗВ-0.5}$.

Для рис. 4, в выполняются условия $\Delta t_{лаз} = \Delta t_{ЭОП}$ и $L_{зад} > l_{лаз}$. В соответствии с табл. 1 зависимости $R(L)$ имеют форму равнобедренного треугольника. Отличительная особенность в данном случае — немонотонное поведение кривых 1 и 2, т. е. они обладают максимумом. Как и в двух предыдущих случаях, при начальном $L_{зад}$ кривая 1 расположена выше кривой 2. Однако различие между их значениями в ~ 2 раза больше, чем на рис. 4, а, б. При сравнительно небольшом увеличении $L_{зад}$ сначала кривая 1, а затем и кривая 2 достигают максимумов. С ростом $L_{зад}$ кривые 1 и 2 также асимптотически сближаются и приближаются к значению ≈ 15 м, равному ширине кривой $R(L)$ на полувысоте.

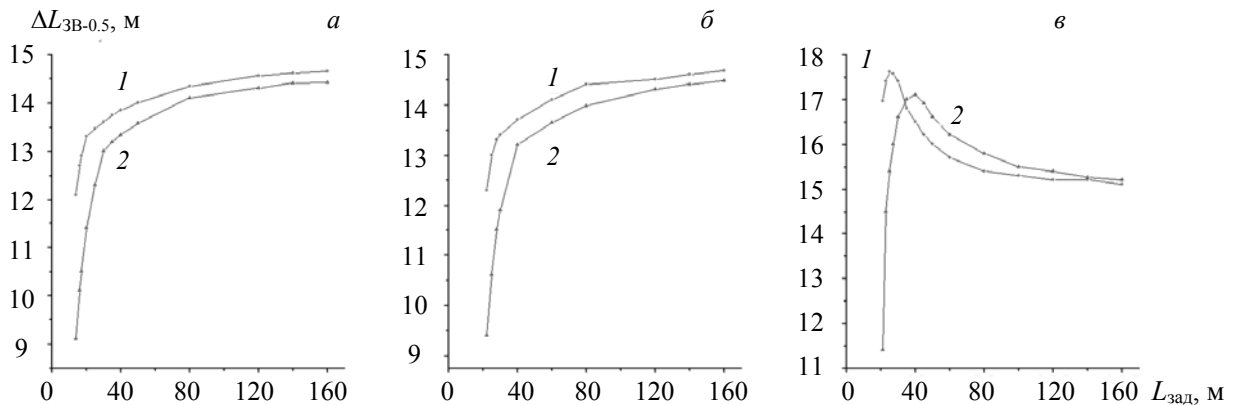


Рис. 4. Зависимости ширины зоны видимости на полувысоте $\Delta L_{ЗВ-0.5}$ от $L_{зад}$ при $\Delta t_{лаз} = 50$ нс и $\Delta t_{ЭОП} = 100$ нс (а), $\Delta t_{лаз} = 100$ нс и $\Delta t_{ЭОП} = 50$ нс (б), $\Delta t_{лаз} = 100$ нс и $\Delta t_{ЭОП} = 100$ нс (в)

Таким образом, при трапецевидной форме кривой $R(L)$ с увеличением $L_{зад}$ наблюдается монотонный рост $\Delta L_{ЗВ-0.5}$, а при треугольной форме $R(L)$ зависимости $\Delta L_{ЗВ-0.5}$ обладают максимумом. Диффузный характер отражения приводит к большей асимметрии ПЭП и большему смещению его максимума к началу зоны видимости при малых $L_{зад}$. В предельном случае больших $L_{зад}$ значение $\Delta L_{ЗВ-0.5}$ асимптотически приближается к соответствующей величине для $R(L)$. На практике путем изменения соотношения между длительностями $\Delta t_{ЭОП}$ и $\Delta t_{лаз}$ можно реализовать наиболее оптимальное значение $\Delta L_{ЗВ-0.5}$.

При наблюдении на наклонных трассах целесообразно ввести угол видимости АИСВ $\alpha_{АИСВ}$, т. е. угол в вертикальной плоскости, ограниченный лучами $L_{нач}$ и $L_{кон}$, которые выделяют на поверхности земли зону видимости длиной $\Delta S_{ЗВ} = S_{кон} - S_{нач}$ [14]. Этот угол может быть значительно меньше угла $\alpha_{опт}$, который определяется, например, оптикой приемного блока АИСВ (на рис. 1 обозначен штриховыми линиями). На рис. 5 приведены примеры расчета зависимости угла $\alpha_{АИСВ}$ от расстояния задержки $L_{зад}$ и высоты h размещения АИСВ. При этом учитывалось $L_{зад}^{мин} = h + c\Delta t_{лаз}/2$. Кривые 1—3 на рис. 5, а при $h = 5.7$ м соответствуют разным длительностям $\Delta t_{лаз}$ и $\Delta t_{ЭОП}$. Как видно, при увеличении $L_{зад}$ сначала наблюдается сравнительно резкое уменьшение угла $\alpha_{АИСВ}$, затем он асимптотически приближается к нулевому значению. Аналогично поведение кривых на рис. 5, б ($\Delta t_{лаз} = 100$ нс, $\Delta t_{ЭОП} = 100$ нс). Такое поведение $\alpha_{АИСВ}(L_{зад})$ объясняется тем, что угол $\alpha_{АИСВ}$ приблизительно определяется проекцией отрезка $\Delta S_{ЗВ}$ на плоскость, перпендикулярную оптической оси АИСВ. Это означает, что видимая на экране видеомонитора длина зоны видимости $\Delta S_{ЗВ}^{вид}$ уменьшается при увеличении $L_{зад}$. Отметим, что в соответствии с рис. 3 при $L_{зад} = 80$ м $m \approx 0.1$, т. е. сигнал сравнительно силь-

но ослабляется. Таким образом, при наблюдении на наклонных трассах реализуемое на практике значение $L_{\text{зад}}$ ограничивается уменьшением как величины сигнала, так и видимой длины $\Delta S_{\text{ЗВ}}^{\text{вид}}$. Для эффективного использования излучения подсветки с ростом $L_{\text{зад}}$ целесообразно уменьшать угол подсветки $\alpha_{\text{лаз}}$ в вертикальной плоскости. В результате можно повышать интенсивность подсветки при увеличении $L_{\text{зад}}$ и, как следствие, дальность наблюдения [22]. Отметим еще одну особенность. Так, например, при высоте объекта 2 м на расстоянии 80 м при наблюдении из точки H его угловой размер равен 1.4° . Из рис. 5, *а* при $L_{\text{зад}} = 80$ м получаем $\alpha_{\text{АИСВ}} = 0.8, 1.6$ и 3.7° (кривые 1, 2 и 3 соответственно). Поэтому объект будет наблюдаться в полную высоту только при параметрах АИСВ, соответствующих кривым 2 и 3.

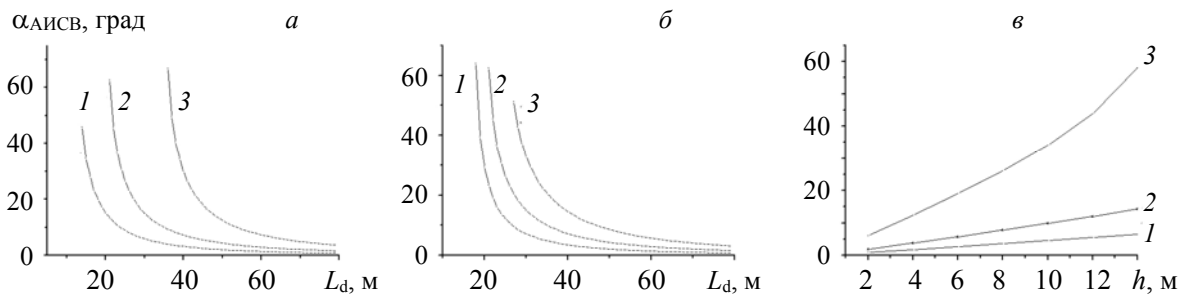


Рис. 5. Зависимости угла видимости $\alpha_{\text{АИСВ}}$ системы от L_d (*а*, *б*) и h (*в*): *а* — $h = 5.7$ м, $\Delta t_{\text{лаз}} = 50$ нс и $\Delta t_{\text{ЭОП}} = 50$ нс (1), $\Delta t_{\text{лаз}} = 100$ нс и $\Delta t_{\text{ЭОП}} = 100$ нс (2), $\Delta t_{\text{лаз}} = 200$ нс и $\Delta t_{\text{ЭОП}} = 200$ нс (3); *б* — $\Delta t_{\text{лаз}} = 100$ нс и $\Delta t_{\text{ЭОП}} = 100$ нс, $h = 2.8$ (1), 5.7 (2) и 11 м (3); *в* — $L_{\text{зад}} = 45$ м, $\Delta t_{\text{лаз}} = 50$ нс и $\Delta t_{\text{ЭОП}} = 50$ нс (1), $\Delta t_{\text{лаз}} = 100$ нс и $\Delta t_{\text{ЭОП}} = 100$ нс (2), $\Delta t_{\text{лаз}} = 200$ нс и $\Delta t_{\text{ЭОП}} = 200$ нс (3)

На рис. 5, *в* приведены зависимости $\alpha_{\text{АИСВ}}$ от h для фиксированного $L_{\text{зад}} = 45$ м. Для кривых 1 и 2 наблюдается линейный рост при увеличении $L_{\text{зад}}$. Кривая 3 претерпевает отклонение от линейной зависимости при возрастании $L_{\text{зад}}$. Таким образом, для роста $\alpha_{\text{АИСВ}}$ при фиксированных длительностях $\Delta t_{\text{лаз}}$ и $\Delta t_{\text{ЭОП}}$ необходимо увеличивать h . При заданной высоте h увеличения $\alpha_{\text{АИСВ}}$ можно достигнуть путем увеличения длительностей $\Delta t_{\text{лаз}}$ и $\Delta t_{\text{ЭОП}}$.

Заключение. Показано, что для случая наблюдения на наклонных трассах, когда фиксируется расположение зоны видимости относительно активно-импульсных систем видения путем выбора $L_{\text{зад}}$, для кооперированного и диффузно отражающего горизонтальных объектов, аналогично наблюдению на горизонтальных трассах, можно выделить условно участок сравнительно малых дистанций, где пространственно-энергетический профиль регистрируемого сигнала имеет вид выпуклых асимметричных кривых с одним максимумом, смещенным к началу зоны видимости. В этом диапазоне характерные расстояния $L_{\text{нач-100\%}}$ и $L_{\text{кон-100\%}}$ не имеют физического смысла. Для кооперированного объекта “малые дистанции” реализуются при $L_{\text{зад}} \leq L_{\text{лаз}} + l$, что совпадает с ранее установленным условием для горизонтальных трасс. При диффузно отражающем объекте соответствующее значение $L_{\text{зад}}^{\text{диф}}$ несколько увеличивается. Для диффузно отражающего объекта при $L_{\text{зад}} > L_{\text{зад}}^{\text{диф}}$ для описания пространственно-энергетического профиля можно использовать полученные ранее для кооперированного объекта аналитические выражения для четырех (или трех) характерных расстояний. Условно в области малых дистанций параметр m , характеризующий отношение максимумов пространственно-энергетического профиля при диффузном и кооперированном отражении, сравнительно быстро уменьшается до 0.1. Далее наблюдается его асимптотическое уменьшение. Минимальные ширины зоны видимости на полувысоте $\Delta L_{\text{ЗВ-0.5}}$ для кооперированного и диффузного объектов достигаются при минимальных $L_{\text{зад}}$. С увеличением $L_{\text{зад}}$ при $\Delta t_{\text{лаз}} \neq \Delta t_{\text{ЭОП}}$ значение $\Delta L_{\text{ЗВ-0.5}}$ сначала сравнительно быстро возрастает, а затем медленно приближается к предельному значению, соответствующему ширине на полувысоте множителя-свертки. При $\Delta t_{\text{лаз}} \neq \Delta t_{\text{ЭОП}}$ на кривых $\Delta L_{\text{ЗВ-0.5}}(L_{\text{зад}})$ присутствует максимум.

При наблюдении на наклонных трассах угол видимости $\alpha_{\text{АИСВ}}$ в типичных условиях значительно меньше угла зрения приемного блока. Он определяется длительностями импульсов подсветки и стробирования, а также расстоянием задержки. Угол $\alpha_{\text{АИСВ}}$ при фиксированных высотах установки ак-

тивно-импульсных систем видения или длительностях импульсов подсветки и стробирования с увеличением $L_{\text{зад}}$ уменьшается сначала сравнительно быстро (приблизительно в области малых дистанций), а затем плавно асимптотически. При фиксированном $L_{\text{зад}}$ с увеличением высоты установки активно-импульсных систем видения угол $\alpha_{\text{АИСВ}}$ также возрастает.

Полученные результаты могут быть использованы, например, при разработке активно-импульсных систем видения, применяемых в качестве одного из бортовых датчиков системы обеспечения безопасной работы большегрузных беспилотных карьерных самосвалов БелАЗ.

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

- [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.** 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] Академик А. А. Лебедев. Избранные труды, отв. ред. П. П. Теофилов, Ленинград, Наука (1974)
- [6] **M. Laurenzis, F. Christnacher.** Opt. Lett., **32**, N 21 (2007) 3146—3148
- [7] **X. Wang, Y. Li, J. Zhou.** Appl. Opt., **52**, N 30 (2013) 7399—7406
- [8] **B. F. Kuntsevich, D. V. Shabrov.** Proc. SPIE, **11159** (2019) 1115910
- [9] **M. Laurenzis, E. Bacher.** Appl. Opt., **50**, N 21 (2011) 3824—3828
- [10] **В. А. Горобец, В. В. Кабанов, В. П. Кабашников, Б. Ф. Кунцевич, Н. С. Метельская, Д. В. Шабров.** Журн. прикл. спектр., **82**, № 1 (2015) 68—75 [**V. A. Gorobets, V. V. Kabanov, V. P. Kabashnikov, B. F. Kuntsevich, N. S. Metelskaya, D. V. Shabrov.** J. Appl. Spectr., **82** (2015) 63—71]
- [11] **D. V. Alant'ev, A. V. Golitsyn, N. A. Seifi.** J. Opt. Technol., **85**, N 6 (2018) 355—358
- [12] **A. A. Golitsyn, N. A. Seyfi.** Appl. Phys., N 1 (2018) 78—83
- [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] **В. А. Горобец, В. В. Кабанов, В. П. Кабашников, Б. Ф. Кунцевич, Н. С. Метельская, Д. В. Шабров.** Журн. прикл. спектр., **83**, № 1 (2016) 105—112 [**V. A. Gorobets, V. V. Kabanov, V. P. Kabashnikov, B. F. Kuntsevich, N. S. Metelskaya, D. V. Shabrov.** J. Appl. Spectr., **83** (2016) 93—99]
- [15] **А. А. Ставров, М. Г. Поздняков.** Докл. БГУИР, **1**, № 2 (2003) 59—65
- [16] **Qi Chen, Anumol Mathai, Xiping Xu, Xin Wang.** Photonics, **6** (2019) 123
- [17] **S. Kruapech, J. Widjaja.** Opt. Laser Technol., **42** (2010) 749—754
- [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 [**B. F. Kuntsevich, V. P. Kabashnikov.** J. Appl. Spectr., **87** (2020) 1112—1116]
- [20] **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]
- [21] **Ю. К. Грузевич.** Оптико-электронные приборы ночного видения, Москва, Физматлит (2014)
- [22] **Ю. Р. Кирпиченко.** Доклады ТУСУРа, № 2 (24), ч. 1 (2011) 114—117