

ОСОБЕННОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПРОФИЛЯ ЗОНЫ ВИДИМОСТИ АКТИВНО-ИМПУЛЬСНЫХ СИСТЕМ ВИДЕНИЯ НА НАКЛОННЫХ ТРАССАХ

Б. Ф. Кунцевич^{1*}, Д. В. Шабров²

УДК 621.384.3:621.391

<https://doi.org/10.47612/0514-7506-2022-89-2-260-268>

¹ ГНПО “Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника”,

Минск, Беларусь; e-mail: bkun@ifanbel.bas-net.by

² Институт физики НАН Беларуси, Минск, Беларусь

(Поступила 15 февраля 2022)

Численно исследованы закономерности формирования пространственно-энергетического профиля зоны видимости активно-импульсными системами видения (АИСВ) на наклонных трассах при диффузном отражении вертикально и горизонтально ориентированных объектов. Предложено учитывать наличие в АИСВ шумового порога и введено понятие контраста сигнала, что позволило приблизить результаты численного моделирования потенциальных возможностей АИСВ к реализуемым экспериментально. Показано, что используемое ранее положение, когда длина зоны видимости однозначно определяется суммой длительностей импульсов подсветки и стробирования, справедливо в случае, если контраст сигнала близок к единице. При рассмотренных типичных параметрах предельная дальность наблюдения вертикальных объектов в ~ 3.8 раза выше, чем горизонтальных. При увеличении высоты установки АИСВ сигнал для вертикальных объектов монотонно уменьшается, а для горизонтальных эта зависимость обладает максимумом. Впервые экспериментально подтверждено уменьшение длины зоны видимости для фиксированных длительностей импульсов подсветки и стробирования при увеличении расстояния задержки.

Ключевые слова: активно-импульсная система видения, закономерности формирования пространственно-энергетического профиля зоны видимости на наклонных трассах, вертикально и горизонтально ориентированные объекты наблюдения, шумовой порог, контраст сигнала.

We numerically investigated the features of the formation of the space-energy profile of the visibility zone by active-pulse vision systems (APVS) on inclined paths with the diffuse reflection of vertically and horizontally oriented objects. We proposed to take into account the presence of a noise threshold in APVS and introduced the concept of signal contrast that permitted to bring the results of the numerical modeling of the potential capabilities of APVS closer to those realized experimentally. It is shown that the position used earlier, when the length of the visibility zone was uniquely determined by the sum of the duration of the illumination and strobing pulses, is valid if the signal contrast is close to unity. With the considered typical parameters, the maximum observation range of vertical objects is approximately 3.8 times higher than the similar value for horizontal objects. When the APVS installation height increases, the signal value for vertical objects decreases monotonically, and for horizontal objects this dependence has a maximum. For the first time, a decrease in the length of the visibility zone for fixed durations of illumination and strobing pulses with an increasing delay distance is experimentally confirmed.

Keywords: active-impulse vision system, features of formation of the space-energy profile of the visibility zone on inclined paths, vertically and horizontally oriented objects of observation, noise threshold, signal contrast.

FEATURES OF THE SPATIAL-ENERGY PROFILE FORMATION FOR THE VISIBILITY ZONE OF ACTIVE-PULSE VISION SYSTEMS ON INCLINED PATHS

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

Введение. В настоящее время для решения многих практических задач используются активно-импульсные системы видения (АИСВ) (см., например, [1—6]). Принцип их действия основан на импульсно-периодической подсветке объектов наблюдения короткими лазерными импульсами длительностью $\Delta t_{\text{лаз}}$ (единицы наносекунд—десятки микросекунд). Синхронно с лазерными импульсами, но с некоторой временной задержкой $\Delta t_{\text{зад}}$ включается приемный блок, например электронно-оптический преобразователь (ЭОП), на короткое время $\Delta t_{\text{фп}}$ (время экспозиции или стробирования), сравнимое с $\Delta t_{\text{лаз}}$. Считается, что указанные системы позволяют видеть объекты в сравнительно узкой полосе пространства (зоне видимости) длиной $\Delta L_{\text{ЗВ}} = c(\Delta t_{\text{лаз}} + \Delta t_{\text{фп}})/2$, где c — скорость света. На основе расстояния задержки $L_{\text{зад}} = c\Delta t_{\text{зад}}/2$ при известных длительностях импульсов подсветки и стробирования можно определить дистанцию до начальной (ближней) и конечной (дальней) точек зоны видимости, а следовательно, и до объектов, расположенных в зоне видимости для двух способов наблюдения [7—9]. Первоначально АИСВ предназначались для наблюдения в условиях пониженной прозрачности атмосферы (дымка, туман, дождь и т. п.) [10]. В настоящее время область применения таких систем видения значительно расширилась. В частности, АИСВ используются для высокоточного определения расстояний до объектов и построения трехмерных изображений и др. [4—6]. В большинстве случаев в приемном блоке АИСВ в качестве быстродействующего затвора и усилителя яркости обычно применяется ЭОП. Для удешевления и уменьшения массогабаритных параметров в [11, 12] предложено использовать фотоприемник на основе приборов с зарядовой связью (ПЗС-фотоприемник) со строчным переносом и специальным режимом управления.

Большинство исследований с использованием АИСВ выполнено для горизонтальных трасс. В некоторых работах рассмотрены особенности случая наклонных трасс, когда АИСВ располагается на некоторой высоте над поверхностью земли, а объекты наблюдения находятся на поверхности земли [1]. В работе [9] для наклонной трассы получены аналитические выражения (при условии, что импульсы подсветки и стробирования имеют прямоугольную форму) для характерных расстояний зоны видимости для частного случая кооперированного объекта, т. е. снабженного ретрорефлектором. При прочих равных условиях отраженный от ретрорефлектора в строго обратном направлении сигнал является максимальным, что повышает дальность действия системы видения. Однако в большинстве практических ситуаций реализуется случай диффузного отражения [13, 14]. Диффузное отражение присуще матовым (шероховатым) поверхностям, для которых размер шероховатостей настолько велик, что падающий луч рассеивается равномерно во все стороны (например, для гипса, мела, песка, камней, бумаги, пластика и др. [13, 14]). Недавно [15] были исследованы особенности формирования сигнала АИСВ на наклонных трассах при диффузном отражении горизонтально расположенных объектов. В то же время на практике часто проводится наблюдение вертикально ориентированных объектов с диффузным отражением. В качестве таких объектов выступают люди, плоские стороны кузовов грузовых автомобилей, стены зданий, специально изготовленные плоские измерительные щиты и др. [1, 5, 6]. Публикации, посвященные изучению закономерностей формирования пространственно-энергетического профиля (ПЭП) регистрируемого сигнала на наклонных трассах для вертикально ориентированных объектов, не известны.

Цель данной работы — исследование закономерностей формирования ПЭП регистрируемого сигнала на наклонных трассах для вертикально ориентированных объектов с диффузным отражением. Для сравнения приводятся результаты расчетов для горизонтальных объектов. На этапе численного моделирования для приближения к реальным экспериментальным условиям предлагается учитывать энергию шумового порога. Ранее такой учет не проводился. Также вводится понятие контраста сигнала.

Закономерности формирования ПЭП зоны видимости АИСВ на наклонных трассах при диффузном отражении объектов. Пусть АИСВ установлена на высоте H относительно поверхности земли (точка O) (рис. 1). Известно [9], что ПЭП зоны видимости в случае кооперированного горизонтального объекта можно характеризовать с помощью четырех элементарных лучей (характерных расстояний) с 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. Эти элементарные лучи соответствуют начальной (ближней) $L_{\text{нач}}$ и конечной (дальней) $L_{\text{кон}}$ точкам зоны видимости, а промежуточные характерные лучи $L_{\text{нач-100\%}}$ и $L_{\text{кон-100\%}}$ либо регистрации сигнала в течение 100 % интервала времени открытого состояния приемного блока (при $\Delta t_{\text{лаз}} > \Delta t_{\text{фп}}$), либо в течение 100 % длительности импульса подсветки (при $\Delta t_{\text{лаз}} < \Delta t_{\text{фп}}$). Элементарным лучам однозначно соответствуют расстояния $S_{\text{нач}}$, $S_{\text{нач-100\%}}$, $S_{\text{кон-100\%}}$ и $S_{\text{кон}}$, отсчитываемые вдоль гори-

горизонтальной поверхности. Из геометрии следует, что $S = (L^2 - h^2)^{1/2}$, где h — длина отрезка OH (высота). Полученные в [9] выражения для этих характерных длин приведены в табл. 1.

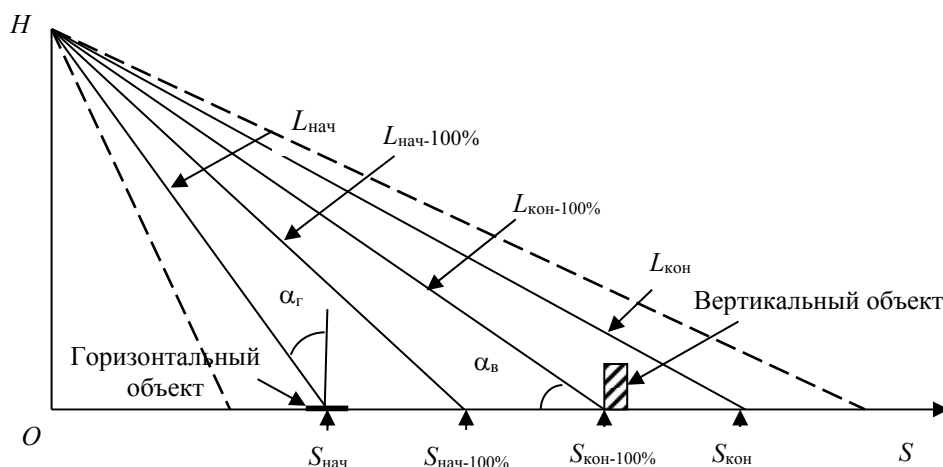


Рис. 1. Характерные элементарные лучи (сплошные линии) $L_{нач}$, $L_{нач-100\%}$, $L_{кон-100\%}$ и $L_{кон}$ и соответствующие им расстояния $S_{нач}$, $S_{нач-100\%}$, $S_{кон-100\%}$ и $S_{кон}$ на поверхности земли при наблюдении на наклонной трассе; штриховые линии изображают плоский угол, соответствующий границам светового пучка лазерной подсветки и угла зрения приемной системы (для простоты полагаются равными); α_v и α_r — углы между направлением на АИСВ и нормалью к поверхности вертикального и горизонтального объектов

Т а б л и ц а 1. Формулы для расчета характерных расстояний [9]

Время	$\Delta t_{лаз} > \Delta t_{фп}$	$\Delta t_{лаз} < \Delta t_{фп}$	$\Delta t_{лаз} = \Delta t_{фп}$
$L_{нач}^T$	$L_{зад} - c\Delta t_{лаз}/2$	$L_{зад} - c\Delta t_{лаз}/2$	$L_{зад} - c\Delta t_{лаз}/2$
$L_{нач-100\%}^T$	$L_{зад} - c(\Delta t_{лаз} - \Delta t_{фп})/2$	$L_{зад}$	$L_{макс} = L_{нач-100\%} =$
$L_{кон-100\%}^T$	$L_{зад}$	$L_{зад} + c(\Delta t_{фп} - \Delta t_{лаз})/2$	$= L_{кон-100\%} = L_{зад}$
$L_{кон}^T$	$L_{зад} + c\Delta t_{фп}/2$	$L_{зад} + c\Delta t_{фп}/2$	$L_{зад} + c\Delta t_{фп}/2$
$\Delta L_{ЗВ}^T = L_{кон}^T - L_{нач}^T$	$c(\Delta t_{лаз} + \Delta t_{фп})/2$	$c(\Delta t_{лаз} + \Delta t_{фп})/2$	$c(\Delta t_{лаз} + \Delta t_{фп})/2$

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 [16]:

$$E = E_c [\exp(-2\sigma L/L^2)] [P(t - 2L/c)G(t - \Delta t_{зад})dt], \quad (1)$$

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 . Далее множитель $E_{пр} = \exp(-2\sigma L/L^2)$ считаем пространственным, поскольку он в явном виде учитывает ослабление излучения при распространении его в атмосфере до объекта и обратно (σ — показатель ослабления), а также расходимость луча подсветки. Множитель $E_{св} = \int P(t - 2L/c)G(t - \Delta t_{зад})dt$ назовем множителем-сверткой, так как он представляет собой свертку двух функций: $P(t)$ — мощности излучения подсветки и $G(t)$ — функции, описывающей временную зависимость чувствительности приемного блока (ЭОП) (t — время, c — скорость света). Этот множитель обусловлен принципом действия АИСВ.

Аналогично [15] рассмотрим случай диффузного отражения, описываемый законом Ламберта, когда интенсивность отраженного света I_d не зависит от углового положения наблюдателя (орто-тропное отражение) и пропорциональна косинусу угла α между направлением на точечный источник света и нормалью к поверхности [13, 14]:

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

где I_0 — интенсивность падающего света; k_d — коэффициент диффузного отражения в диапазоне 0—1, учитывающий свойства материала отражающей поверхности. Ортогональное отражение является идеализацией реального отражения, однако из-за простоты часто используется при моделировании.

В соответствии с рис. 1 учтем, что объекты могут быть расположены горизонтально (“г”) или вертикально (“в”). Значения E_v и E_g вычислялись на основе (1):

$$E_v = E \cos \alpha_v, E_g = E \cos \alpha_g, \quad (3)$$

Ограничиваясь случаем качественного выяснения основных закономерностей, на основании рис. 1 получаем:

$$\cos \alpha_v = (L^2 - h^2)^{1/2}/L, \cos \alpha_g = h/L. \quad (4)$$

Согласно [2], на практике в АИСВ существует шумовой порог. Это ведет к тому, что даже в отсутствие входного излучения в приемном канале имеется сигнал, соответствующий шумовому порогу. Шумовой порог не зависит от уровня входного излучения и присутствует всегда. Его можно изменить только за счет оптимизации конструктивных параметров системы. Ему соответствует некоторое значение энергии шумового порога $E_{шп}$ [2]. При вычислении E с использованием (3) учитываем, что E не может быть меньше $E_{шп}$, следовательно, значения $E < E_{шп}$ заменяются на $E_{шп}$. Зависимости рис. 2 учитывают указанный фактор, т. е. минимальное (“нулевое”) значение $E = E_{шп}$.

Для характеристики качества изображений часто используются различные понятия контраста изображения K . Например, $K = (E_{об} - E_{ф})/(E_{об} + E_{ф})$, где $E_{об}$ и $E_{ф}$ — яркости объекта и фона [1]. По аналогии на стадии численных расчетов, основываясь на вычислении E_v или E_g , определяем:

$$K = (E - E_{шп})/(E + E_{шп}), \quad (5)$$

где E — сигналы, вычисленные с помощью (3).

При расчетах для определенности используются типичные параметры: $h = 5.7$ м (соответствует установке АИСВ на большегрузном карьерном самосвале БелАЗ [9]), $G_m = 30000$ — амплитуда коэффициента усиления фотоприемника (1), $P_m = 640$ мВт — амплитуда мощности подсветки в (1), $E_{шп} = 4 \cdot 10^{-13}$ Дж [17], $S_{мдв} = 20$ км — метеорологическая дальность видимости, $k_{д-в} = k_{д-г} = 0.5$ — коэффициенты диффузного отражения объектов; формы импульсов подсветки и стробирования (усиления фотоприемника) задаются прямоугольными.

На рис. 2 представлены результаты расчета сигналов E_v , E_g и контрастов K_v , K_g в зависимости от L . ПЭП в случае вертикального объекта (рис. 2, а, кривая 1) имеет форму типа квазитрапеции. В соответствии с табл. 1 на ПЭП можно выделить характерные расстояния: $L_{нач-100\%}^T = L_{зад} = 75$ м и $L_{кон-100\%}^T = L_{зад} + c(\Delta t_{лаз} + \Delta t_{фп}) = 81$ м (индекс “т” указывает, что значение получено на основе аналитических выражений табл. 1). Они соответствуют полученным расчетным путем (обозначены вертикальными линиями). В то же время для кривой 1 имеет место $L_{нач} = 63.6$ м и $L_{нач}^T = 63$ м, для конечной точки $L_{кон} = 91.5$ м и $L_{кон}^T = 93$ м. Несовпадение $L_{нач}$, $L_{нач}^T$ и $L_{кон}$, $L_{кон}^T$ объясняется учетом вклада $E_{шп}$. Для горизонтального объекта (кривая 2) ПЭП отличается принципиально как по форме, так и по величине. Максимальные значения ПЭП (индекс “м” в $E_{вм}$ и $E_{гм}$), на которые нормированы кривые 1 и 2, сильно различаются: $E_{вм} = 6.0 \cdot 10^{-12}$ Дж и $E_{гм} = 4.6 \cdot 10^{-13}$ Дж. Это обусловлено тем, что $\cos \alpha_v \approx 1$ (при $L \gg h$), $\cos \alpha_g = h/L$. Действительно, при качественном объяснении можно принять, что при типичных параметрах АИСВ диапазон ΔL сосредоточен вблизи расстояния задержки $L_{зад}$, т. е. $\Delta L \sim L_{зад}$. Таким образом, $\cos \alpha_g \sim h/L_{зад}$. С учетом этого (3) можно представить в виде

$$E_v = E_c R / L_{зад}^2, E_g = E_c R / L_{зад}^3 \text{ при } \exp(-2\sigma L) \approx 1. \quad (6)$$

Из (6) следует, что эхо-сигнал при наблюдении горизонтальных объектов сравнительно быстро уменьшается пропорционально $1/L_{зад}^3$. Для вертикальных объектов наблюдается более медленное ослабление сигнала ($1/L_{зад}^2$). Отсюда следует, что максимальные дальности наблюдения реализуются для вертикальных объектов. Из рис. 2, а (кривая 2) видно, что кубическая зависимость $E_g \sim 1/L_{зад}^3$ приводит к сравнительно большому взаимному сближению характерных расстояний до $L_{нач} = 72.4$ м и $L_{кон} = 78.5$ м (удалению их от соответствующих значений $L_{нач}^T$ и $L_{кон}^T$) и существенному уменьшению $\Delta L_{зв}$. При малом $\Delta L_{зв}$ характерные расстояния $L_{нач-100\%}^T$ и $L_{кон-100\%}^T$ не проявляются и ПЭП приобретает форму типа треугольника с максимумом в точке $L_{зад}$.

Аналогичные зависимости представлены на рис. 2, в для случая что $\Delta t_{лаз} = 120$ нс, $\Delta t_{фп} = 80$ нс. Это привело к увеличению как максимумов ПЭП (соотношения сигнал/шум) для обоих случаев ($E_{вм} = 1.1 \cdot 10^{-11}$ Дж и $E_{гм} = 8.8 \cdot 10^{-13}$ Дж), так и длин зон видимости. Обозначенные вертикальными линия-

ми характерные расстояния соответствуют табличным: $L_{\text{нач-100\%}}^T = 69.0$ м и $L_{\text{кон-100\%}}^T = L_{\text{зад}} = 75.0$ м. Вследствие увеличения длины зоны видимости на кривой 2 проявляются точки $L_{\text{кон-100\%}}^T = L_{\text{зад}}$ и $L_{\text{кон-100\%}}^T$. В соответствии с табл. 1 для кривых 1 и 2 должны выполняться условия $L_{\text{нач}}^T = 57.0$ м и $L_{\text{кон}}^T = 87.0$ м. Из рис. 2 видно, что для кривой 1 $L_{\text{нач}} = 57.2$ м и $L_{\text{кон}} = 86.3$, для кривой 2 $L_{\text{нач}} = 60.0$ м и $L_{\text{кон}} = 78.9$ м. Анализ показывает, что сдвиг между соответствующими расстояниями для кривой 1 обусловлен учетом $E_{\text{шп}}$. Для кривой 2 дополнительное и определяющее влияние оказывает фактор $E_{\text{г}} \sim 1/L_{\text{зад}}^3$.

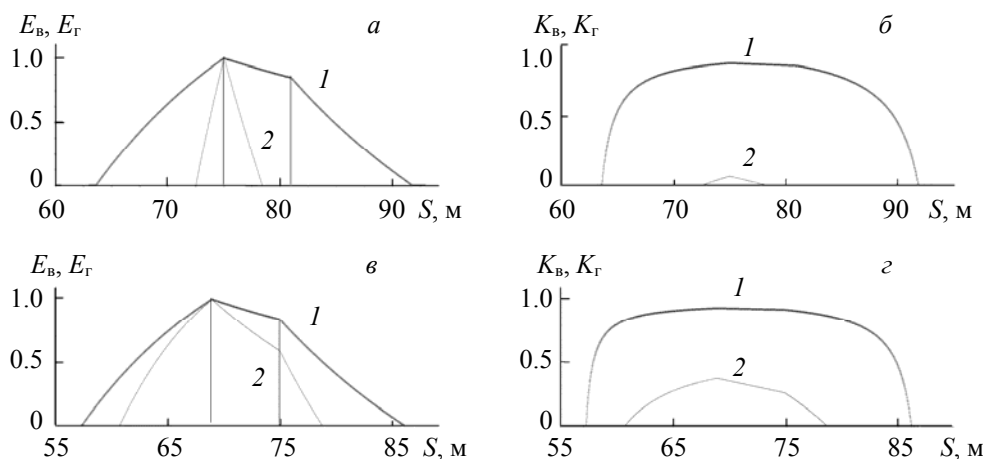


Рис. 2. Зависимости величин эхо-сигналов E_b (1), E_g (2) и контраста сигналов K_b, K_g от расстояния L ; $\Delta t_{\text{лаз}} = 80$ нс (а, б), 120 нс (в, з), $\Delta t_{\text{фп}} = 120$ нс (а, б), 80 нс (в, з); а — $E_{\text{вм}} = 6.0 \cdot 10^{-12}$ Дж (при $L_{\text{м}} = 75$ м), $E_{\text{гм}} = 4.6 \cdot 10^{-13}$ Дж (при $L_{\text{м}} = 75$ м); в — $E_{\text{вм}} = 1.1 \cdot 10^{-11}$ Дж (при $L_{\text{м}} = 69$ м), $E_{\text{гм}} = 8.8 \cdot 10^{-13}$ Дж (при $L_{\text{м}} = 69$ м); б — $\Delta L_{\text{ЗВ-в}} = 28.2$ м, $\Delta L_{\text{ЗВ-г}} = 6.0$ м; з — $\Delta L_{\text{ЗВ-в}} = 28.9$ м, $\Delta L_{\text{ЗВ-г}} = 18.2$ м

На рис. 2, б и з приведены пространственные зависимости контрастов K_b и K_g , вычисленные с помощью (5) для двух соотношений между длительностями $\Delta t_{\text{лаз}}$ и $\Delta t_{\text{фп}}$. Видно, что граничные расстояния для K_b и K_g совпадают с соответствующими расстояниями $L_{\text{нач}}$ и $L_{\text{кон}}$ (рис. 2, а и б). Таким образом, $\Delta L_{\text{ЗВ}}$ можно определять по кривым либо E_b и E_g , либо K_b и K_g . Анализ показывает, что расстояния $L_{\text{м}}$, обозначающие максимумы ПЭП, совпадают с аналогичными для контраста для соответствующих кривых. Максимальные значения контраста коррелируют с максимумами ПЭП. Отметим, что полученные при расчетах длины зон видимости $\Delta L_{\text{ЗВ-в}}$ и $\Delta L_{\text{ЗВ-г}}$ меньше предельно возможного значения $\Delta L_{\text{ЗВ}}^T = c(\Delta t_{\text{лаз}} + \Delta t_{\text{фп}}) = 30$ м. Кроме того, из сравнения кривых 1 и 2 видно, что основные параметры эхо-сигнала существенно зависят от соотношения $\Delta t_{\text{лаз}}$ и $\Delta t_{\text{фп}}$.

Из рис. 2 следует вывод, что учет шумового порога оказывает существенное влияние на ПЭП (величину, форму и значения (присутствие) характерных расстояний), контраст сигнала и длину зоны видимости. Его проявление сравнительно сильно зависит от длительности импульса подсветки $\Delta t_{\text{лаз}}$ и вида объекта (вертикальный или горизонтальный).

С практической точки зрения наибольший интерес представляет предельная дальность действия АИСВ. Это эквивалентно определению предельных расстояний задержек $L_{\text{зад}}$, где либо эхо-сигнал превышает $E_{\text{шп}}$, либо контраст сигнала больше нуля. На рис. 3 приведены зависимости максимальных значений эхо-сигналов $E_{\text{вм}}$ и $E_{\text{гм}}$, контрастов сигналов $K_{\text{вм}}$ и $K_{\text{гм}}$, а также реализуемых при этом длин зон видимостей $\Delta L_{\text{ЗВ-в}}$ и $\Delta L_{\text{ЗВ-г}}$ от $L_{\text{зад}}$. Уменьшение максимальных эхо-сигналов с увеличением $L_{\text{зад}}$ в целом соответствует ранее известной закономерности. Новым и важным с практической точки зрения является демонстрация того, что при одних и тех же параметрах АИСВ дальность наблюдения вертикальных объектов значительно выше, чем горизонтальных. Из рис. 3, а отношение предельных значений $L_{\text{зад-в-пр}}/L_{\text{зад-г-пр}} = 340/90 = 3.8$. Аналогичное отношение получено для рис. 3, б. Видно, что при малых $L_{\text{зад}}$ для выбранных параметров АИСВ практически реализуются предельно возможные значения контраста, равные единице, как для вертикальных, так и для горизонтальных объектов. Однако в соответствии с (6) с увеличением $L_{\text{зад}}$ различие между $K_{\text{вм}}$ и $K_{\text{гм}}$ резко возрастает. Влияние $L_{\text{зад}}$ на длины зон видимости демонстрируется на рис. 3, в. В соответствии с табл. 1 (и другими работами

(см., например, [4—6]) в данном случае $\Delta L_{ЗВ}^T = c(\Delta t_{лаз} + \Delta t_{фп}) = 30$ м. Действительно, как видно из рис. 3, в, при малых $L_{зад}$ это справедливо. Однако при увеличении $L_{зад}$ вследствие учета шумового порога $E_{шп}$ значения $\Delta S_{ЗВ-В}$ и $\Delta S_{ЗВ-Г}$ уменьшаются. Резкое увеличение различия между $\Delta L_{ЗВ-В}$ и $\Delta L_{ЗВ-Г}$ объясняется с помощью (6). На рис. 3 показано, что увеличение $L_{зад}$ ведет к уменьшению эхо-сигналов как для вертикальных, так и для горизонтальных объектов. Используемое допущение об однозначном определении длины зоны видимости длительностями импульсов подсветки и стробирования справедливо в диапазоне, где контраст сигнала близок к единице. Величины эхо-сигналов, контраста и длин зон видимостей сравнительно быстро “расходятся” при увеличении расстояния задержки, что объясняется также противоположным характером влияния (увеличением и уменьшением) множителей $\cos\alpha_В$ и $\cos\alpha_Г$ на эхо-сигналы.

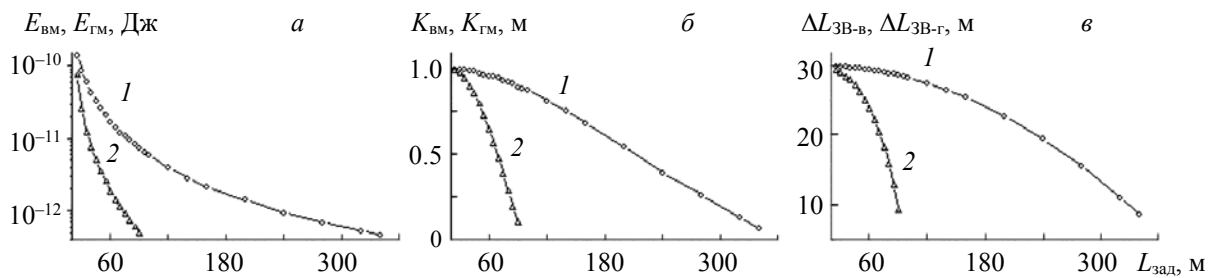


Рис. 3. Зависимости основных параметров эхо-сигнала ($E_В$ и $E_Г$ (а), $K_В$ и $K_Г$ (б), $\Delta L_{ЗВ-В}$ и $\Delta L_{ЗВ-Г}$ (в)) для вертикальных (1) и горизонтальных (2) объектов от расстояния задержки $L_{зад}$; $\Delta t_{лаз} = 120$ нс, $\Delta t_{фп} = 80$ нс

Рассмотрим более детально влияние длительности импульса подсветки $\Delta t_{лаз}$ на основные параметры эхо-сигнала (рис. 4). Для наглядности ограничимся случаем $\Delta t_{лаз} + \Delta t_{фп} = 200$ нс. Это означает, что изменение длительности $\Delta t_{лаз}$ ведет к соответствующему варьированию $\Delta t_{фп}$. Из рис. 4, а видно, что кривые $E_В$ и $E_Г$ обладают максимумом. Его наличие можно объяснить следующим образом. На начальном этапе, т. е. до достижения максимума, преобладающим фактором является увеличение сигнала за счет роста длительности $\Delta t_{лаз}$. После достижения максимума сигнал сравнительно быстро уменьшается из-за преобладающего влияния уменьшения длительности строб-импульса, т. е. вследствие уменьшения длительности экспозиции фотоприемника увеличивается доля энергии эхо-сигнала, которая не регистрируется. Отметим, что на рис. 4 кривые 1 расположены выше кривых 2. Это означает, что при наблюдении вертикальных объектов реализуются более благоприятные основные параметры эхо-сигнала по сравнению с горизонтальными объектами.

На рис. 4, б приведены зависимости контрастов сигналов от длительности подсветки $\Delta t_{лаз}$. Как и следовало ожидать, минимальные значения K реализуются в области минимальных эхо-сигналов. Максимумы для кривых 1 на рис. 4, а и б достигаются при длительности подсветки $\Delta t_{лаз-м} = 150$ нс,

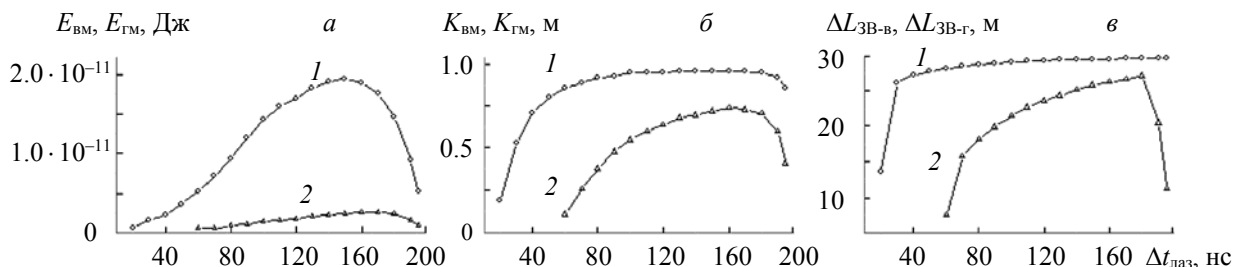


Рис. 4. Зависимости основных параметров эхо-сигналов ($E_В$ и $E_Г$ (а), $K_В$ и $K_Г$ (б), $\Delta L_{ЗВ-В}$ и $\Delta L_{ЗВ-Г}$ (в)) для вертикальных (1) и горизонтальных (2) объектов от длительности импульса подсветки $\Delta t_{лаз}$ при $\Delta t_{лаз} + \Delta t_{фп} = 120$ нс; $L_{зад} = 60$ м; а — $E_В = 1.9 \cdot 10^{-11}$ Дж (при $t_{лаз} = 150$ нс), $E_Г = 1.6 \cdot 10^{-12}$ Дж (при $t_{лаз} = 160$ нс); б — $K_В = 0.96$ (при $t_{лаз} = 150$ нс), $K_Г = 0.74$ (при $t_{лаз} = 160$ нс); в — $\Delta L_{ЗВ-В-М} = 29.7$ м (при $t_{лаз} = 195$ нс), $\Delta L_{ЗВ-Г-М} = 27.1$ м (при $t_{лаз} = 180$ нс)

для кривых 2 $\Delta t_{\text{лаз-м}} = 170$ и 160 нс (рис. 4, а и б). Рис. 4, в демонстрирует, что используемое в литературе выражение $\Delta L_{3B}^T = c(\Delta t_{\text{лаз}} + \Delta t_{\text{фп}}) = 30$ м имеет ограниченную область применения. Видно, что начальные значения кривых 1 и 2 сравнительно сильно отличаются от предельно возможного ΔL_{3B}^T , поскольку соответствующие им эхо-сигналы малы (контраст также мал). Можно считать, что для кривой 1 параметр ΔL_{3B}^T применим в диапазоне $\Delta t_{\text{лаз}} \approx 60\text{—}195$ нс, где $\Delta L_{3B-в} \approx \Delta L_{3B}^T = 30$ м (т. е. при $K_{\text{в}} \approx 1$). Для кривой 2 вследствие сравнительно малого эхо-сигнала (контраста сигнала) условие $\Delta L_{3B-г} \approx \Delta L_{3B}^T$ не достигается.

При наблюдении на наклонных трассах практический интерес также представляет выбор оптимальной высоты расположения АИСВ. На рис. 5 продемонстрировано влияние высоты h расположения системы видения на основные параметры АИСВ для расстояний задержек $S_{\text{зад}} = 30$ и 60 м. Из рис. 5, а и г видно качественное совпадение кривых для вертикальных $E_{\text{вм}}$ и горизонтальных $E_{\text{гм}}$ объектов при разных $L_{\text{зад}}$. Для вертикальных объектов (кривые 1) эхо-сигнал $E_{\text{вм}}$ при увеличении h монотонно уменьшается. Это объясняется в основном уменьшением значения $\cos\alpha_{\text{в}}$. При наблюдении горизонтальных объектов (кривые 2) сигнал $E_{\text{гм}}$ сначала увеличивается, а затем уменьшается, т. е. зависимость $E_{\text{гм}}(h)$ обладает максимумом $E_{\text{гм}}(h_{\text{м}})$. Начальное увеличение $E_{\text{гм}}$ обусловлено ростом $\cos\alpha_{\text{г}}$. Последующее уменьшение $E_{\text{гм}}$ объяснено при обсуждении рис. 5, в и е. Значительное отличие сигналов $E_{\text{вм}}$ и $E_{\text{гм}}$ при начальных значениях h объясняется влиянием множителей $\cos\alpha_{\text{в}}$ и $\cos\alpha_{\text{г}}$. При малых h для горизонтальных объектов реализуется случай “скользящей” подсветки объектов ($\cos\alpha_{\text{г}} \rightarrow 0$), а вертикальные объекты освещаются практически перпендикулярно их поверхности ($\cos\alpha_{\text{в}} \rightarrow 1$). Высота h , соответствующая пересечению кривых 1 и 2 на рис. 5, а и г, увеличивается с ростом расстояния задержки $S_{\text{зад}}$.

На рис. 5, б и д продемонстрировано поведение контраста сигналов для вертикальных $K_{\text{вм}}$ и горизонтальных $K_{\text{гм}}$ объектов. При выбранных параметрах для вертикальных объектов практически во всем диапазоне изменения h контраст сигнала приблизительно соответствует предельно возможному значению $K_{\text{вм}} \approx 1$. Его резкое падение наблюдается на конечном участке вследствие преобладающего влияния множителя $\cos\alpha_{\text{в}}$. Для горизонтальных объектов на начальном участке $K_{\text{гм}}$ минимально, поскольку минимальна величина $\cos\alpha_{\text{г}}$. Дальнейший рост $K_{\text{гм}}$ до достижения предельного значения $K_{\text{гм}} = 1$ обусловлен увеличением $\cos\alpha_{\text{г}}$. Обратим внимание, что начальные значения $K_{\text{гм}}$ (рис. 4, б и д) существенно отличаются ($0.78/0.25 \approx 3$). Это объясняется тем, что при заданном сравнительно малом h с увеличением $S_{\text{зад}}$ значение $\cos\alpha_{\text{г}}$ уменьшается (приближение к случаю “скользящей” подсветки).

На рис. 5, в и е отражено влияние высоты установки h системы видения на длину зоны видимости для горизонтальных и вертикальных объектов. Как и в предыдущих случаях, наблюдается совпадение качественного поведения кривых 1 и 2 для обоих значений $S_{\text{зад}}$. На начальных участках кривой 1

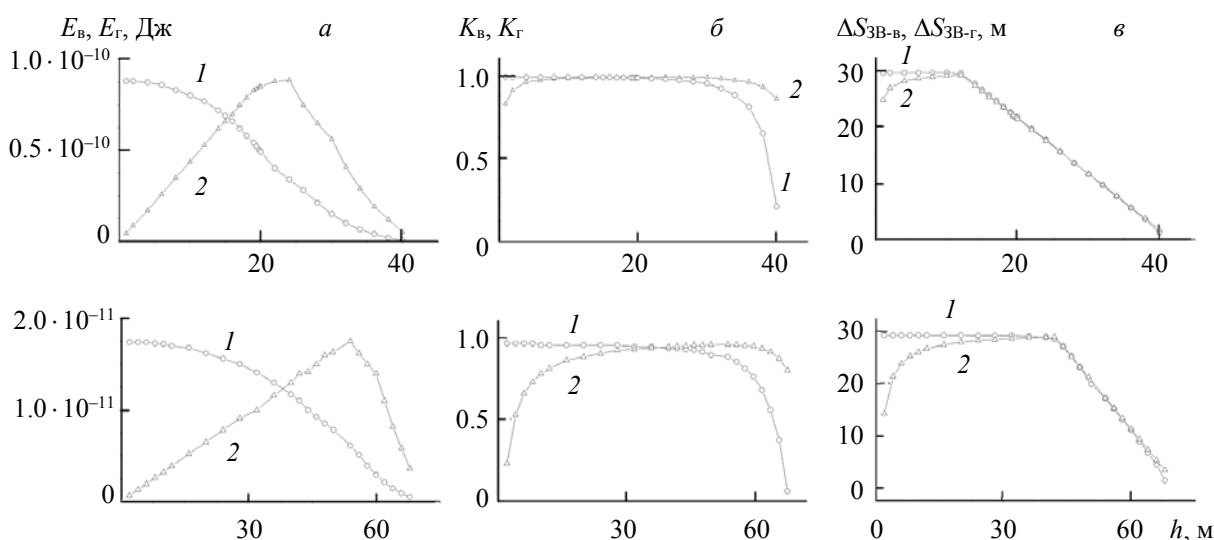


Рис. 5. Зависимости основных параметров эхо-сигналов для вертикальных (1) и горизонтальных (2) объектов от высоты h установки АИСВ при $\Delta t_{\text{лаз}} = 120$ нс, $\Delta t_{\text{фп}} = 80$ нс, $L_{\text{зад}} = 30$ (а—в) и 60 нс (г—е)

($h \leq 12$ м для рис. 5, в и $h \leq 42$ м для рис. 5, е) $\Delta L_{ЗВ-в} \approx \Delta L_{ЗВ-г} \approx 30$ м. Это обусловлено тем, что в данном диапазоне для рис. 5, в $L_{нач} \approx L_{нач}^T = 12$ м, $L_{кон} \approx L_{кон}^T = 42$ м, для рис. 5, е $L_{нач} \approx L_{нач}^T = 42$ м, $L_{кон} \approx L_{кон}^T = 72$ м. В этом же диапазоне наблюдается увеличение $\Delta L_{ЗВ-г}$ (кривая 2) вследствие роста $E_{ГМ}$ (рис. 5, а и з). На конечных участках ($h > 12$ м для рис. 5, в и $h > 42$ м для рис. 5, е), где выполняется условие $\Delta L_{ЗВ-в} \approx \Delta L_{ЗВ-г}$, длины обеих зон видимости уменьшаются по линейному закону с увеличением h . При этом, как следует из рис. 1, при наблюдении на наклонных трассах должно выполняться условие $L_{нач}^T \geq h$. Поэтому при расчетах принималось $L_{нач}^T = h$ (в случае рис. 5, в при $h > 12$ м, для рис. 5, в при $h > 42$ м). Условие $L_{нач}^T \geq h$ также приводит к наличию ниспадающих участков для кривой 2 на рис. 5, а и з.

Результаты и их обсуждение. Одним из проявлений учета $E_{шп}$ является уменьшение $\Delta S_{ЗВ}$ при увеличении $S_{зад}$. Для экспериментальной проверки выполнено измерение длины зоны видимости $\Delta S_{ЗВ}$ при двух расстояниях задержки $S_{зад}$. Для этого использовалась АИСВ со встроенным фрейм-граббером. При измерениях человек перемещался по коридору здания шириной 240 см вдоль оптической оси системы видения. Начальная $S_{нач}$ и конечная $S_{кон}$ точки зоны видимости определялись путем наблюдения изображения на экране видеомонитора. Для увеличения точности для каждого значения $S_{зад}$ проводилось по два измерения: при удалении объекта от АИСВ (1) и при приближении объекта к АИСВ (2). Результаты представлены в табл. 2, где $\Delta S_{ЗВ}^{cp}$ — среднее значение двух измерений.

Т а б л и ц а 2. Результаты измерений $\Delta S_{ЗВ}$

Параметр	$\Delta S_{ЗВ}$, м	$\Delta S_{ЗВ}^{cp}$, м
$S_{зад} = 60$ м		
Измерение 1	34.3	34.2
Измерение 2	34.1	
$S_{зад} = 110$ м		
Измерение 1	30.8	30.6
Измерение 2	30.4	

Задавались следующие длительности импульсов подсветки и стробирования: $\Delta t_{лаз} = 122$ нс и $\Delta t_{фп} = 122$ нс. При $S_{зад} = 60$ м получено $\Delta S_{ЗВ}^{cp-1} = 34.2$ м, а при $S_{зад} = 110$ м — $\Delta S_{ЗВ}^{cp-2} = 30.6$ м. По оценкам погрешность определения расстояний $S_{нач}$ и $S_{кон}$ составляла ± 0.5 м. Согласно табл. 1, теоретическое значение длины зоны видимости (т. е. без учета $E_{шп}$): $\Delta S_{ЗВ}^T = c(\Delta t_{лаз} + \Delta t_{фп}) = 36.6$ м. Как и следовало ожидать, значения $\Delta S_{ЗВ}^{cp-1}$ и $\Delta S_{ЗВ}^{cp-2}$ меньше $\Delta S_{ЗВ}^T$. Кроме того, $\Delta S_{ЗВ}^{cp-1} > \Delta S_{ЗВ}^{cp-2}$. Это качественно согласуется с приведенными выше результатами. Дополнительные расчеты, аналогичные представленным на рис. 2, а и в, показали, что для реализации $\Delta S_{ЗВ}^{T1} = 34.2$ м при расчетах необходимо использовать $E_{шп} = 2 \cdot 10^{-13}$ Дж, а для получения $\Delta S_{ЗВ}^{T2} = 30.7$ м — $E_{шп} = 1 \cdot 10^{-12}$ Дж. Отсюда следует, что значение $E_{шп}$ зависит, по-видимому, от $S_{зад}$. Поэтому необходимо более детальное изучение вопроса обоснования корректного выбора $E_{шп}$ и зависимости $E_{шп}$ от других параметров АИСВ (например, $S_{зад}$). Сравнение расчетных $\Delta S_{ЗВ}^T(S_{зад})$ и экспериментальных $\Delta S_{ЗВ}(S_{зад})$ зависимостей может служить основой для определения $E_{шп}$ конкретной системы видения.

Закключение. Численно исследованы закономерности формирования пространственно-энергетического профиля зоны видимости активно-импульсными системами видения на наклонных трассах при диффузном отражении вертикально и горизонтально ориентированных объектов. Предложено учитывать наличие в активно-импульсных системах видения шумового порога и введено понятие контраста сигнала, что позволило приблизить результаты численного моделирования потенциальных возможностей активно-импульсных систем видения к реализуемым экспериментально. Показано, что используемое ранее в литературе положение, когда длина зоны видимости однозначно определяется суммой длительностей импульсов подсветки и стробирования, справедливо в случае, если контраст сигнала близок к единице. Из расчетов следует, что учет шумового порога оказывает существенное влияние на пространственно-энергетический профиль и контраст сигнала (их величину, форму и характерные расстояния), длину зоны видимости. Его проявление сильно зависит от длительности импульса подсветки $\Delta t_{лаз}$ (что эквивалентно изменению отношения сигнал/шум) и вида объекта (вертикальный или горизонтальный). При рассмотренных типичных параметрах предельная дальность наблюдения вертикальных объектов в ~ 3.8 раза выше, чем горизонтальных. При увеличении высоты установки активно-импульсных систем видения сигнал для вертикальных объектов монотонно пада-

ет. Это объясняется в основном тем, что при диффузном отражении уменьшается значение $\cos\alpha_v$. Для горизонтальных объектов подобная зависимость обладает максимумом. Отличительной особенностью наблюдения на наклонных трассах является необходимость учета фактора, что длина луча $L_{\text{нач}}$ не может быть меньше высоты установки системы. Это ведет, начиная с некоторого значения h^* , к уменьшению длины зоны видимости. Большим расстояниям задержки соответствуют большие h^* . Впервые экспериментально подтверждено уменьшение длины зоны видимости для фиксированных длительностей импульсов подсветки и стробирования при увеличении расстояния задержки.

Авторы выражают благодарность И. Н. Пучковскому за подготовку активно-импульсных систем видения к работе и помощь в проведении экспериментальных измерений.

- [1] **И. Л. Гейхман, В. Г. Волков.** Основы улучшения видимости в сложных условиях, Москва, ООО “Недра-Бизнес-центр” (1999)
- [2] **В. Е. Карасик, В. М. Орлов.** Лазерные системы видения, уч. пособие, Москва, МГТУ им. Н. Э. Баумана (2001)
- [3] **В. Г. Волков, Б. А. Случак.** Науч.-техн. журн. “Контент”, **15**, № 3 (2016) 62—70
- [4] **V. Goehler, P. Lutzmann.** Opt. Engin., **56**, N 3 (2017) 031203
- [5] **M. Laurenzis, E. Bacher.** Appl. Opt., **50**, N 21 (2011) 3824—3828
- [6] **X. Wang, Y. Li, J. Zhou.** Appl. Opt., **52**, N 30 (2013) 7399—7406
- [7] **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. Gorobetz, V. V. Kabanov, V. P. Kabashnikov, V. F. Kuntsevich, N. S. Metelskaya, D. V. Shabrov.** J. Appl. Spectr., **81** (2014) 279—287]
- [8] **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. Gorobetz, V. V. Kabanov, V. P. Kabashnikov, V. F. Kuntsevich, N. S. Metelskaya, D. V. Shabrov.** J. Appl. Spectr., **82** (2015) 63—71]
- [9] **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. Gorobetz, V. V. Kabanov, V. P. Kabashnikov, V. F. Kuntsevich, N. S. Metelskaya, D. V. Shabrov.** J. Appl. Spectr., **83** (2016) 93—99]
- [10] Академик А. А. Лебедев. Избранные труды, под ред. П. П. Теофилова, Ленинград, Наука (1974)
- [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] **Q. Chen, A. Mathai, X. Xu, X. Wang.** Photonics, **6** (2019) 123
- [14] **S. Kruapech, J. Widjaja.** Opt. Laser Technol., **42** (2010) 749—754
- [15] **Б. Ф. Кунцевич, В. П. Кабашников, Д. В. Шабров.** Журн. прикл. спектр., **88**, № 5 (2021) 782—790 [**V. F. Kuntsevich, V. P. Kabashnikov, D. V. Shabrov.** J. Appl. Spectr., **88** (2021) 1012—1019]
- [16] **Б. Ф. Кунцевич, В. П. Кабашников.** Журн. прикл. спектр., **87**, № 6 (2020) 984—989 [**V. F. Kuntsevich, V. P. Kabashnikov.** J. Appl. Spectr., **87** (2020) 1112—1116]
- [17] **O. Steinvall, H. Olsson, G. Bolander.** Proc. SPIE, **3707** (1999) 432—448