

## СРАВНЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРОФИЛЕЙ ЗОН ВИДИМОСТИ АКТИВНО-ИМПУЛЬСНЫХ СИСТЕМ ВИДЕНИЯ ДЛЯ ДВУХ СПОСОБОВ НАБЛЮДЕНИЯ

Б. Ф. Кунцевич\*, И. Н. Пучковский, С. С. Шавель

УДК 621.384.3:621.391

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

(Поступила 22 июня 2023)

Путем численного моделирования выполнено сравнение особенностей формирования пространственно-энергетических профилей (ПЭП) зон видимости для двух способов наблюдения (СН) при учете энергии шумового порога  $E_{шп}$ . Подтверждено для обоих СН, что соотношение, в котором длина зоны видимости (ЗВ) однозначно определяется суммой длительностей импульсов подсветки и стробирования (экспозиции фотоприемника), справедливо при условии близости к единице максимального значения контраста сигнала, достигаемого в пределах зоны видимости. Для второго СН подробно изучено превращение ПЭП при сравнительно малых рабочих дистанциях в короткий на полувысоте выпуклый асимметричный пик, максимум которого в предельном случае смещается в начало ЗВ. Это объясняется преобладающим влиянием так называемого пространственного множителя на формирование ПЭП. Несмотря на некоторое пространственное смещение ПЭП относительно друг друга для первого и второго СН для случая, когда длительности импульсов подсветки и стробирования не равны, максимальные значения регистрируемых сигналов и их контраста, а также длины зон видимости для обоих СН при типичных параметрах в большинстве случаев практически совпадают. Для частного случая, когда длительность импульса подсветки меньше длительности строб-импульса, экспериментально получены ПЭП зон видимости для первого и второго СН, которые подтверждают результаты выполненных расчетов.

**Ключевые слова:** активно-импульсная система видения, пространственно-энергетический профиль, зона видимости, контраст сигнала, энергия шумового порога.

By means of numerical simulation, a comparison was made of the features of the formation of spatial-energy profiles (SEP) of visibility zones (VZ) for the first and second methods of observation (MO), taking into account the energy of the noise threshold  $E_{nt}$ . It was confirmed for both MOs that the relation previously used in the literature, when the length of the VZ is uniquely determined by the sum of the durations of the illumination and strobing pulses (photodetector exposure), is valid provided that the maximum value of the signal contrast achieved within the VZ is close to unit. For the second MO, the transformation of the SEP at relatively short working distances into a short, convex asymmetric peak at half height, the maximum of which in the limiting case is shifted to the beginning of the VZ, has been studied in detail. This is explained by the predominant influence of the so-called spatial factor on the formation of SEP. Despite some spatial displacement of the SEP relative to each other for the first and second SN for the case when the duration of the illumination and strobing pulses are not equal, the maximum values of the recorded signals and their contrast, as well as the lengths of the visibility zones for both MOs, with typical parameters, in most cases practically coincide. For a particular case, when the duration of the illumination pulse is less than the duration of the strobe pulse, the SEPs of the VZ for the first and second MO were experimentally obtained, which confirm the results of the performed calculations.

**Keywords:** active-pulse vision system, spatial-energy profile, visibility zone, signal contrast, noise threshold energy.

---

## COMPARISON OF THE SPATIAL-ENERGY PROFILES OF VISIBILITY ZONES OF ACTIVE- PULSE VISION SYSTEMS FOR TWO OBSERVATION METHODS

B. F. Kuntsevich\*, I. N. Puchkouski, S. S. Shavel (SSPA “Optics, Optoelectronics, and Laser Technology”,  
Minsk, Belarus; e-mail: bkun@ifanbel.bas-net.by)

**Введение.** В настоящее время большое внимание уделяется исследованию и разработке активно-импульсных систем видения (АИСВ) для решения различных научных и практических задач [1—6]. Кратко принцип работы АИСВ можно сформулировать следующим образом. Область наблюдения освещается периодически повторяющимися лазерными импульсами, длительность которых  $\Delta t_{\text{лаз}}$  значительно меньше времени распространения света до зоны наблюдения и обратно. В приемном блоке в качестве быстродействующего затвора и усилителя принимаемого отраженного светового излучения чаще всего используется электронно-оптический преобразователь (ЭОП), который синхронно включается с лазерными импульсами на время  $\Delta t_{\text{фп}}$  (строб-импульс), сравнимое с  $\Delta t_{\text{лаз}}$ . Регулировка времени задержки  $\Delta t_{\text{зад}}$  между началами импульсов подсветки и стробирования изменяет расстояние до зоны наблюдения. АИСВ позволяют наблюдать объекты в сравнительно узком слое пространства, называемом зоной видимости (ЗВ). Первоначально АИСВ предназначались для наблюдения в условиях пониженной прозрачности атмосферы (дымка, туман, дождь и т. п.), поскольку вследствие стробирования они позволяют “отсекать” сигнал помехи обратного рассеяния от близко расположенного слоя дымки, тумана и др. К настоящему времени область применения таких систем значительно расширилась. В частности, АИСВ используются для высокоточного определения расстояний до объектов и построения так называемых трехмерных (3D) изображений [4—6]. Для удешевления и уменьшения массогабаритных параметров в [7, 8] предложено в приемном блоке вместо ЭОП использовать фотоприемник на основе приборов с зарядовой связью со строчным переносом и специальным режимом управления.

Можно условно выделить два способа наблюдения (СН) объектов с помощью АИСВ и последующего определения расстояний до них [6, 9]. Первый СН назовем методом послойного просмотра пространства (time slicing или depth scanning). Он используется для обнаружения, распознавания и регистрации объектов путем последовательно изменения (увеличения или уменьшения) времени задержки с некоторым шагом. Второй СН соответствует наблюдению объектов в пределах фиксированной ЗВ, пространственное расположение которой определяется выбором на пульте управления определенного расстояния задержки  $S_{\text{зад}} = c\Delta t_{\text{зад}}/2$ . При этом можно наблюдать совокупность объектов, расположенных на разных расстояниях в пределах ЗВ, или отслеживать передвижение объекта вдоль ЗВ [5, 6]. Ко второму СН также относится реализация предложения по использованию АИСВ на транспорте для отслеживания дорожной обстановки и обеспечения безопасности движения [10, 11]. При рассмотрении первого и второго СН неявно предполагалось, что реализуется случай горизонтального наблюдения, когда АИСВ и объект расположены на горизонтальной поверхности земли. Однако в силу некоторых специфических особенностей формирования ЗВ часто выделяется случай наблюдения на наклонных трассах [1]. При этом обычно предполагается, что АИСВ расположена на некоторой высоте. Недавно [12] получен ряд новых закономерностей для этого СН. Далее случай наблюдения на наклонных трассах не рассматриваем.

В работах [13, 14] для первого и второго СН при прямоугольной форме импульсов подсветки и стробирования дана физическая интерпретация основных закономерностей образования пространственно-энергетического профиля (ПЭП) ЗВ и получены аналитические выражения для характерных расстояний (точек) ЗВ (начальная  $S_{\text{нач}}$  и конечная  $S_{\text{кон}}$  точки, начальное  $S_{\text{нач-100\%}}$  и конечное  $S_{\text{кон-100\%}}$  расстояния, ограничивающие дистанцию, где принимаемый сигнал регистрируется в течение 100 % интервала времени включенного состояния фотоприемника  $\Delta t_{\text{фп}}$  (при  $\Delta t_{\text{лаз}} > \Delta t_{\text{фп}}$ ), либо в течение 100 % длительности импульса подсветки  $\Delta t_{\text{лаз}}$  (при  $\Delta t_{\text{лаз}} < \Delta t_{\text{фп}}$ ). Указанные сведения для первого и второго СН приведены в табл. 1 и 2 (верхний индекс “т” указывает, что соответствующее характерное расстояние представляет аналитическое выражение, которое приведено в таблице; введены обозначения:  $\Delta S_{\text{ЗВ}}^{\text{т}} = S_{\text{кон}}^{\text{т}} - S_{\text{нач}}^{\text{т}}$ ,  $\Delta S_{100\%}^{\text{т}} = S_{\text{кон-100\%}}^{\text{т}} - S_{\text{нач-100\%}}^{\text{т}}$ ,  $\Delta S_{\text{фр}}^{\text{т}} = S_{\text{нач-100\%}}^{\text{т}} - S_{\text{нач}}^{\text{т}}$  и  $\Delta S_{\text{сп}}^{\text{т}} = S_{\text{кон}}^{\text{т}} - S_{\text{кон-100\%}}^{\text{т}}$ ; цифры в верхних индексах обозначают СН). Для каждого из СН предложены упрощенные алгоритмы определения расстояний до объектов.

В [13, 14] и в публикациях других авторов (например, [10]) предполагается, что длина ЗВ, отсчитываемая вдоль оптической оси АИСВ, однозначно определяется длительностями импульсов подсветки и стробирования:

$$\Delta S_{\text{ЗВ}} = c(\Delta t_{\text{лаз}} + \Delta t_{\text{фп}})/2. \quad (1)$$

Недавно было установлено [15, 16], что для первого СН, а также для наклонных трасс при учете в АИСВ энергии шумового порога  $E_{\text{шп}}$  выражение (1) имеет ограниченную область применения. Кроме того, при наблюдении на наклонных трассах на сравнительно малых расстояниях реализуется особая форма ПЭП в виде выпуклых асимметричных кривых с максимумом, смещенным к началу ЗВ [17].

**Т а б л и ц а 1. Формулы для расчета характерных расстояний и длин характерных участков для первого способа наблюдения [13]**

Время	$\Delta t_{\text{лаз}} > \Delta t_{\text{фп}}$	$\Delta t_{\text{лаз}} < \Delta t_{\text{фп}}$	$\Delta t_{\text{лаз}} = \Delta t_{\text{фп}}$
$S_{\text{нач}}^{T1}$ $S_{\text{нач-100\%}}^{T1}$ $S_{\text{кон-100\%}}^{T1}$ $S_{\text{кон}}^{T1}$	$S_{\text{об}} - c\Delta t_{\text{фп}}/2$ $S_{\text{об}}$ $S_{\text{об}} + c(\Delta t_{\text{лаз}} - \Delta t_{\text{фп}})/2$ $S_{\text{об}} + c\Delta t_{\text{лаз}}/2$	$S_{\text{об}} - c\Delta t_{\text{фп}}/2$ $S_{\text{об}} - c(\Delta t_{\text{фп}} - \Delta t_{\text{лаз}})/2$ $S_{\text{об}}$ $S_{\text{об}} + c\Delta t_{\text{лаз}}/2$	$S_{\text{об}} - c\Delta t_{\text{фп}}/2$ $S_{\text{макс}} = S_{\text{нач-100\%}}^{T1} =$ $= S_{\text{кон-100\%}}^{T1} = S_{\text{об}}$ $S_{\text{об}} + c\Delta t_{\text{лаз}}/2$
<i>Длины характерных участков</i>			
$\Delta S_{3В}^{T1}$ $\Delta S_{100\%}^{T1}$ $\Delta S_{\text{фр}}^{T1}$ $\Delta S_{\text{сп}}^{T1}$	$c(\Delta t_{\text{лаз}} + \Delta t_{\text{фп}})/2$ $c(\Delta t_{\text{лаз}} - \Delta t_{\text{фп}})/2$ $c\Delta t_{\text{фп}}/2$ $c\Delta t_{\text{фп}}/2$	$c(\Delta t_{\text{лаз}} + \Delta t_{\text{фп}})/2$ $c(\Delta t_{\text{фп}} - \Delta t_{\text{лаз}})/2$ $c\Delta t_{\text{лаз}}/2$ $c\Delta t_{\text{лаз}}/2$	$c(\Delta t_{\text{лаз}} + \Delta t_{\text{фп}})/2$ — $c\Delta t_{\text{фп}}/2$ $c\Delta t_{\text{лаз}}/2$

**Т а б л и ц а 2. Формулы для расчета характерных расстояний и длин характерных участков для второго способа наблюдения [14]**

Время	$\Delta t_{\text{лаз}} > \Delta t_{\text{фп}}$	$\Delta t_{\text{лаз}} < \Delta t_{\text{фп}}$	$\Delta t_{\text{лаз}} = \Delta t_{\text{фп}}$
$S_{\text{нач}}^{T2}$ $S_{\text{нач-100\%}}^{T2}$ $S_{\text{кон-100\%}}^{T2}$ $S_{\text{кон}}^{T2}$	$S_{\text{зад}} - c\Delta t_{\text{лаз}}/2$ $S_{\text{зад}} - c(\Delta t_{\text{лаз}} - \Delta t_{\text{фп}})/2$ $S_{\text{зад}}$ $S_{\text{зад}} + c\Delta t_{\text{фп}}/2$	$S_{\text{зад}} - c\Delta t_{\text{лаз}}/2$ $S_{\text{зад}}$ $S_{\text{зад}} + c(\Delta t_{\text{фп}} - \Delta t_{\text{лаз}})/2$ $S_{\text{зад}} + c\Delta t_{\text{фп}}/2$	$S_{\text{зад}} - c\Delta t_{\text{лаз}}/2$ $S_{\text{макс}} = S_{\text{нач-100\%}}^{T2} =$ $= S_{\text{кон-100\%}}^{T2} = S_{\text{зад}}$ $S_{\text{зад}} + c\Delta t_{\text{фп}}/2$
<i>Длины характерных участков</i>			
$\Delta S_{3В}^{T2}$ $\Delta S_{100\%}^{T2}$ $\Delta S_{\text{фр}}^{T2}$ $\Delta S_{\text{сп}}^{T2}$	$c(\Delta t_{\text{лаз}} + \Delta t_{\text{фп}})/2$ $c(\Delta t_{\text{лаз}} - \Delta t_{\text{фп}})/2$ $c\Delta t_{\text{фп}}/2$ $c\Delta t_{\text{фп}}/2$	$c(\Delta t_{\text{лаз}} + \Delta t_{\text{фп}})/2$ $c(\Delta t_{\text{фп}} - \Delta t_{\text{лаз}})/2$ $c\Delta t_{\text{лаз}}/2$ $c\Delta t_{\text{лаз}}/2$	$c(\Delta t_{\text{лаз}} + \Delta t_{\text{фп}})/2$ — $c\Delta t_{\text{лаз}}/2$ $c\Delta t_{\text{фп}}/2$

Настоящая работа посвящена сравнительному анализу особенностей формирования ПЭП ЗВ, которые реализуются для первого и второго СН при учете энергии шумового порога. Для второго СН детально изучены и объяснены закономерности формирования ПЭП при наблюдении на малых дистанциях.

**Исходные уравнения и предположения.** Для описания ПЭП регистрируемого сигнала  $E_1$  при первом СН можно использовать выражение (см., например, [15]):

$$E_1 = E_0 S_{\text{об}}^{-2} \exp(-2\alpha S_{\text{об}}) \int L(t - 2S_{\text{об}}/c) G(t - \Delta t_{\text{зад}}) dt, \quad (2)$$

где  $S_{\text{об}}$  — расстояние до объекта;  $E_0$  — константа, не зависящая от  $S_{\text{об}}$ ;  $\alpha$  — показатель ослабления лазерного излучения в атмосфере;  $t$  — время;  $L$  и  $G$  — функции, описывающие временные зависимости интенсивности излучения лазерной подсветки и чувствительности (коэффициента усиления) приемного блока (строб-импульса). Здесь и далее индексы 1 и 2 указывают на первый и второй СН.

При втором СН выражение для регистрируемого сигнала  $E_2$  несколько видоизменяется [16]:

$$E_2 = E_0 S_n^{-2} \exp(-2\alpha S_n) \int L(t - 2S_n/c) G(t - \Delta t_{\text{зад}}) dt, \quad (3)$$

где  $S_n$  — расстояние до исследуемого объекта, который находится в  $n$ -й точке в пределах ЗВ.

Отметим, что при первом СН ПЭП, получаемый с использованием выражения (2), является функцией расстояния задержки  $S_{\text{зад}} = c\Delta t_{\text{зад}}/2$ , т. е.  $E_1(S_{\text{зад}})$ . При втором СН (выражение (3)) при расчетах длина ЗВ разбивается на  $N$  интервалов. Величина сигнала  $E_2$  вычисляется последовательно для каждой точки  $n = 1, \dots, N$ , которой соответствует расстояние  $S_n$ . В данном случае  $E_2(S_n)$ .

В дальнейшем множители, обусловленные физическим принципом работы АИСВ:

$$E_{\text{св1}} = \int L(t - 2S_{\text{об}}/c) G(t - \Delta t_{\text{зад}}) dt \quad \text{и} \quad E_{\text{св2}} = \int L(t - 2S_n/c) G(t - \Delta t_{\text{зад}}) dt \quad (4)$$

будем называть множителями-свертками для первого  $E_{\text{св1}}$  и второго  $E_{\text{св2}}$  СН, а множители

$$E_{\text{пр1}} = S_{\text{об}}^{-2} \exp(-2\alpha S_{\text{об}}) \quad \text{и} \quad E_{\text{пр2}} = S_n^{-2} \exp(-2\alpha S_n) \quad (5)$$

пространственными, поскольку они в явном виде учитывают расстояние.

Следует отметить, что в АИСВ существует так называемый шумовой порог [2]. Это означает, что даже в отсутствие входного излучения в приемном канале присутствует сигнал, соответствующий

шумовому порогу. Аналогично [15, 16] поставим ему в соответствие некоторое значение энергии шумового порога  $E_{\text{шп}}$ . При вычислении величины сигналов  $E_1$  и  $E_2$  при использовании выражений (2) и (3) будем учитывать, что значения  $E_1$  и  $E_2$  не могут быть меньше  $E_{\text{шп}}$ . Это означает, что все полученные при расчетах значения  $E_1$  и  $E_2$ , меньшие  $E_{\text{шп}}$ , заменяются на  $E_{\text{шп}}$ .

На практике для характеристики качества изображений часто используются различные понятия контраста изображения  $K_{\text{из}}$ . Например, в [2]:  $K_{\text{из}} = (E_{\text{об}} - E_{\text{ф}})/(E_{\text{об}} + E_{\text{ф}})$ , где  $E_{\text{об}}$  и  $E_{\text{ф}}$  — яркости объекта и фона. По аналогии при численных расчетах введем понятие контраста сигнала  $K$  следующим образом [15, 16]:

$$K = (E - E_{\text{шп}})/(E + E_{\text{шп}}), \quad (6)$$

где  $E$  — величина регистрируемого сигнала.

**Результаты расчетов и их обсуждение.** При расчетах используем выражение:  $L = P_{\text{лаз1}} \Delta t_{\text{лаз}} \nu_{\text{лаз}} N_{\text{лаз}}$ , где  $P_{\text{лаз1}} = 320$  Вт — амплитуда мощности излучения одного лазера,  $\nu_{\text{лаз}} = 5$  кГц — частота следования лазерных импульсов,  $N_{\text{лаз}} = 2$  — число лазеров в блоке подсветки; длина волны излучения лазерной подсветки 840 нм; максимальное значение (амплитуда) коэффициента усиления приемного блока 30000; метеорологическая дальность видимости 20 км. В работе [18] указано, что для ЭОП 3-го поколения энергия, эквивалентная шуму, составляет  $E_{\text{ЭОП}} = 6 \cdot 10^{-20}$  Дж/пиксель. Учитывая, что современные ЭОП могут содержать  $\sim 1 \cdot 10^8$  микроканалов [19], для определенности при расчетах (если не оговорено другое) принято  $E_{\text{шп}} = 1 \cdot 10^{-12}$  Дж. Для простоты рассматриваем случай, соответствующий прямоугольной форме импульсов лазерной подсветки и стробирования (экспозиции) фотоприемника.

Первоначально целесообразно продемонстрировать влияние энергии шумового порога  $E_{\text{шп}}$  на особенности формирования ПЭП для двух СН (рис. 1). В соответствии с [13] при первом СН ПЭП имеет форму трапеции, а при втором [14] — так называемой квазитрапеции (боковые стороны (фронт и спад) не являются прямыми линиями, а верхнее основание не соответствует горизонтальной линии), поскольку  $\Delta t_{\text{лаз}} \neq \Delta t_{\text{фп}}$ . Из рис. 1 видно, что увеличение  $E_{\text{шп}}$  в обоих случаях ведет к росту так называемого “нулевого” уровня сигнала (нижние горизонтальные участки кривых 1), равного  $E_{\text{шп}}$ , максимальные значения сигналов  $E_{\text{макс1}}$  и  $E_{\text{макс2}}$  при этом остаются неизменными. Для нормировки кривых 2 используются другие значения, несущественные для рассмотрения. Из рис. 1, а–в видно, что при выбранной нормировке пространственный ход кривых 1 и 2 совпадает. Это обусловлено тем, что в пределах ЗВ  $E_{\text{пр1}} = S_{\text{об}}^{-2} \exp(-2\alpha S_{\text{об}}) = \text{const}$ , а пространственное изменение ПЭП определяется только множителем-сверткой  $E_{\text{св1}}$ . Таким образом, в данном случае увеличение  $E_{\text{шп}}$  ведет к уменьшению длины ЗВ ( $\Delta S_{\text{ЗВ}} = S_{\text{кон}} - S_{\text{нач}}$ ) вследствие смещения характерных расстояний  $S_{\text{нач}}$  и  $S_{\text{кон}}$  к центру ЗВ

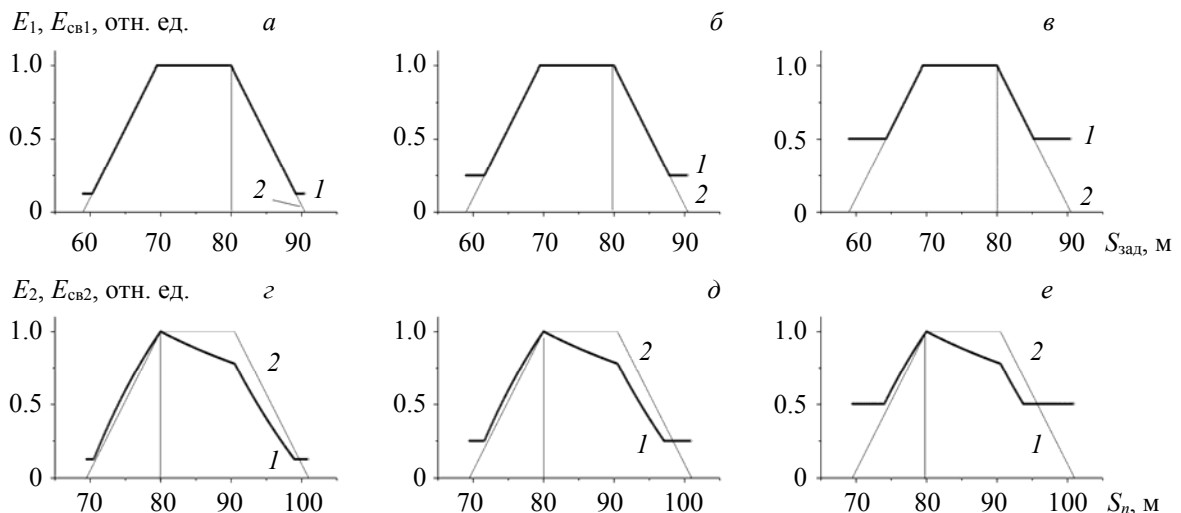


Рис. 1. Зависимости величин регистрируемых сигналов  $E$  (1) и множителей-сверток  $E_{\text{св}}$  (2) для первого (а–в) и второго (г–д) способов наблюдения от расстояний  $S_{\text{зад}}$  и  $S_{\text{л}}$ ;  $\Delta t_{\text{лаз}} = 70$  нс,  $\Delta t_{\text{фп}} = 140$  нс; вертикальными линиями отмечены расстояния  $S_{\text{об}} = 80$  м (а–в);  $S_{\text{зад}} = 80$  м (г–е);  $E_{\text{макс1}} = 8 \cdot 10^{-12}$  Дж (а–в),  $E_{\text{макс2}} = 8 \cdot 10^{-12}$  Дж (г–е);  $E_{\text{шп}} = 1 \cdot 10^{-12}$  Дж (а, г),  $2 \cdot 10^{-12}$  Дж (б, д) и  $4 \cdot 10^{-12}$  Дж (в, е)

на одну и ту же величину. Одинаковое смещение объясняется тем, что длины фронта и спада равны друг другу (табл. 1):  $\Delta S_{\text{фр}} = \Delta S_{\text{сп}} = c\Delta t_{\text{лаз}}/2$  (при  $\Delta t_{\text{лаз}} < \Delta t_{\text{фп}}$ ) и  $\Delta S_{\text{фр}} = \Delta S_{\text{сп}} = c\Delta t_{\text{фп}}/2$  (при  $\Delta t_{\text{лаз}} > \Delta t_{\text{фп}}$ ). Однако при втором СН (рис. 1,  $z-e$ ) ход кривых 1 и 2 несколько различается, особенно в области  $S > S_{\text{нач-100\%}}^2 = 80$  м. Это обусловлено дополнительным влиянием пространственного множителя  $E_{\text{пр2}} = S_n^{-2} \exp(-2\alpha S_n)$ . Множитель  $E_{\text{пр2}}$  также ответствен за достижение максимального значения сигнала всегда в точке  $S_{\text{нач-100\%}}^2 = 80$  м, которая расположена ближе к АИСВ, чем точка  $S_{\text{кон-100\%}}^2 = 90.5$  м. В данном случае можно условно выделить два механизма уменьшения  $\Delta S_{\text{ЗВ}}$ . Первый механизм обусловлен “подъемом” вверх горизонтальных участков кривых 1 (аналогично первому СН) вследствие учета  $E_{\text{шп}}$ . Второй механизм основан на влиянии множителя  $E_{\text{пр2}}$  на величину принимаемого сигнала  $E_2$ . Из рис. 1,  $z-e$  видно, что в диапазоне  $S_n < S_{\text{нач-100\%}}^1$  кривые 1 и 2 практически совпадают и проявление этого механизма пренебрежимо мало. Однако на интервале  $S_n > S_{\text{нач-100\%}}^2$  кривые 1 и 2 разделяются. При этом в области спада кривая 1 смещается в область меньших  $S_n$  по сравнению со спадом кривой 2. Это ведет к дополнительному уменьшению характерного расстояния  $S_{\text{кон-100\%}}^2$ , а следовательно, и  $\Delta S_{\text{ЗВ}}$ . Таким образом, при обоих СН одним из главных проявлений учета  $E_{\text{шп}}$  является уменьшение длины ЗВ  $\Delta S_{\text{ЗВ}} = S_{\text{кон}} - S_{\text{нач}}$  при увеличении  $E_{\text{шп}}$ . При втором СН появляется дополнительный механизм, обусловленный влиянием пространственного множителя.

На рис. 2 приведены для сравнения ПЭП ЗВ для двух СН и трех соотношений между длительностями  $\Delta t_{\text{лаз}}$  и  $\Delta t_{\text{фп}}$ , вертикальные линии при первом способе наблюдения обозначают расстояние до объекта  $S_{\text{об}}$ , при втором — расстояние задержки  $S_{\text{зад}}$ . При первом СН  $S_x = S_{\text{зад}}$ , при втором  $S_x = S_n$ . Для пояснения некоторых характерных особенностей поведения кривых 1 и 2 целесообразно обратиться к полученным [13] без учета энергии шумового порога ( $E_{\text{шп}} = 0$ ) для первого СН и в [14] для второго СН аналитическим выражениям для характерных расстояний, приведенным в табл. 1 и 2. На примере кривой 1 рис. 2,  $в$  поясним расположение характерных расстояний (точек) ПЭП:  $S_{\text{нач}}^1 = 31.0$  м,  $S_{\text{нач-100\%}}^1 = S_{\text{об}} = 40.0$  м,  $S_{\text{кон-100\%}}^1 = 51.9$  м и  $S_{\text{кон}}^1 = 61.0$  м. Аналогично для второго СН (кривая 2):  $S_{\text{нач}}^2 = 19.0$  м,  $S_{\text{нач-100\%}}^2 = 28.0$  м,  $S_{\text{кон-100\%}}^2 = S_{\text{зад}} = 40.0$  м и  $S_{\text{кон}}^2 = 49.0$  м. Некоторые значения характерных расстояний (в первую очередь  $S_{\text{нач}}$  и  $S_{\text{кон}}$ ), следующие из рис. 2, несколько отличаются от вычисляемых аналитически с помощью выражений табл. 1 и 2 (индекс “т”), так как получены с учетом  $E_{\text{шп}}$ .

Рассмотрим рис. 2,  $а$ , соответствующий равенству длительностей импульсов подсветки и стробирования:  $\Delta t_{\text{лаз}} = \Delta t_{\text{фп}} = 100$  нс. В соответствии с табл. 1 и 2 для описания ПЭП можно использовать три характерных расстояния:  $S_{\text{нач}}^{\text{т}}$ ,  $S_{\text{кон}}^{\text{т}}$  и расстояние  $S_{\text{макс}}^{\text{т}}$ , соответствующее максимуму сигнала. Для кривых 1 и 2 эти значения совпадают. Так называемая “квазиправильная” форма кривой 2 обусловлена влиянием пространственного множителя  $E_{\text{пр2}}$ .

На рис. 2,  $б$  приведены аналогичные зависимости для  $\Delta t_{\text{лаз}} < \Delta t_{\text{фп}}$ . Отличительной особенностью является то, что ПЭП для первого и второго СН пространственно “перекрываются” только частично. В целом ПЭП для первого СН смещен ближе к АИСВ. Такое расположение ПЭП качественно объясняется с использованием характерных расстояний из табл. 1 и 2. Действительно, при первом СН  $S_{\text{нач}}^{\text{т1}} = S_{\text{об}} - c\Delta t_{\text{фп}}/2$ ,  $S_{\text{кон}}^{\text{т2}} = S_{\text{об}} + c\Delta t_{\text{лаз}}/2$ , а при втором:  $S_{\text{нач}}^{\text{т2}} = S_{\text{зад}} - c\Delta t_{\text{лаз}}/2$ ,  $S_{\text{кон}}^{\text{т2}} = S_{\text{зад}} + c\Delta t_{\text{фп}}/2$ . Приведенные выражения с учетом условий  $S_{\text{об}} = S_{\text{зад}}$  и  $\Delta t_{\text{лаз}} < \Delta t_{\text{фп}}$  полностью качественно объясняют полученное взаимное расположение ПЭП для обоих СН.

Зависимости на рис. 2,  $в$  иллюстрируют противоположный случай, когда  $\Delta t_{\text{лаз}} > \Delta t_{\text{фп}}$ . Видно, что ПЭП для второго СН в целом смещен ближе к АИСВ. Такое поведение качественно согласуется с приведенными в табл. 1 и 2 аналитическими выражениями для характерных расстояний.

Из сравнения рис. 2,  $б$  и  $в$  можно сделать следующие выводы. При первом СН ПЭП обладает платообразным участком, когда величина сигнала в пределах определенного интервала расстояний поддерживается постоянной. Это в ряде случаев представляет практический интерес. Длину платообразного участка можно регулировать путем изменения соотношения между длительностями  $\Delta t_{\text{лаз}}$  и  $\Delta t_{\text{фп}}$ . ПЭП для второго СН имеет вид квазитрапеции. Максимум сигнала достигается всегда в точке  $S_{\text{нач-100\%}}^{\text{т2}}$ , которая расположена ближе к АИСВ по сравнению с точкой  $S_{\text{кон-100\%}}^{\text{т2}}$ . При используемых параметрах в обоих случаях длина ЗВ для каждого из СН приблизительно одинакова ( $\approx 30$  м). Однако на рис. 2,  $в$  максимальное значение сигнала для кривой 2 в  $\sim 2$  раза выше, чем для кривой 1. Это обусловлено тем, что максимум кривой 2 расположен ближе к АИСВ.

При увеличении расстояний  $S_{\text{об}}$  и  $S_{\text{зад}}$  до значений, приближающихся к предельно возможным, рис. 2,  $z-e$  демонстрируют уменьшение длины ЗВ по сравнению с рис. 2,  $а-в$ . Вследствие реализуемых в предельных случаях сравнительно малых  $\Delta S_{\text{ЗВ}}$  может изменяться форма ПЭП. Например, на рис. 2,  $б$  для второго СН ПЭП имеет форму квазитрапеции, а на рис. 2,  $д$  — треугольника (кривые 2).

Обобщить результаты рис. 2 можно следующим образом. Из табл. 1 и 2 видно, что в зависимости от СН значения  $S_{\text{нач}}^{\tau 1}$ ,  $S_{\text{нач}}^{\tau 2}$  и  $S_{\text{кон}}^{\tau 1}$ ,  $S_{\text{кон}}^{\tau 2}$  определяются длительностями разных процессов. Действительно, для начальных точек ЗВ  $S_{\text{нач}}^{\tau 1}(\Delta t_{\text{фп}})$  и  $S_{\text{нач}}^{\tau 2}(\Delta t_{\text{лаз}})$ , а для конечных:  $S_{\text{кон}}^{\tau 1}(\Delta t_{\text{лаз}})$  и  $S_{\text{кон}}^{\tau 2}(\Delta t_{\text{фп}})$ . Тогда при равенстве времен  $\Delta t_{\text{лаз}}$  и  $\Delta t_{\text{фп}}$  ЗВ для обоих СН должны пространственно совпадать. При  $\Delta t_{\text{лаз}} \neq \Delta t_{\text{фп}}$  ЗВ для первого и второго СН смещаются в пространстве в противоположных направлениях относительно друг друга. Результаты расчетов подтверждают сказанное. При первом СН при  $\Delta t_{\text{лаз}} \neq \Delta t_{\text{фп}}$  ПЭП обладает платообразным участком, что в ряде случаев может представлять практический интерес. При втором СН максимум ПЭП всегда достигается в точке  $S_{\text{нач-100\%}}^{\tau 2}$ .

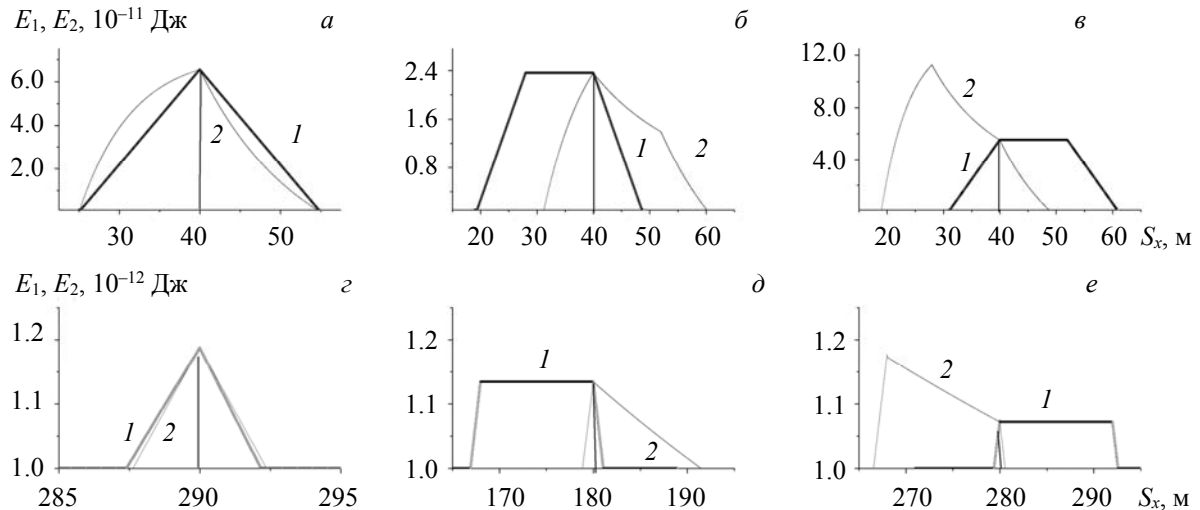


Рис. 2. Зависимости величин регистрируемых сигналов для первого  $E_1$  (1) и второго  $E_2$  (2) способов наблюдения от расстояния  $S_x$ ;  $S_x = 40$  (а–в), 290 (г), 180 (д) и 280 м (е); а, г —  $\Delta t_{\text{лаз}} = \Delta t_{\text{фп}} = 100$  нс; б, д —  $\Delta t_{\text{лаз}} = 60$  нс,  $\Delta t_{\text{фп}} = 140$  нс; в, е —  $\Delta t_{\text{лаз}} = 140$  нс,  $\Delta t_{\text{фп}} = 60$  нс

Рассмотрим случай особого поведения ПЭП для второго СН, который проявляется при определенном соотношении параметров АИСВ и дистанции наблюдения (рис. 3). Общим и закономерным для всех представленных на рис. 3 зависимостей является то, что значения граничных характерных расстояний  $S_{\text{нач}}$  и  $S_{\text{кон}}$ , определяющих границы ЗВ, для кривых 1 и 2 практически совпадают. Исключение составляет рис. 3, в, для которого вследствие учета  $E_{\text{шп}}$  при выбранном сочетании параметров  $\Delta t_{\text{лаз}}$  и  $S_{\text{зад}}$  начинает проявляться уменьшение длины  $\Delta S_{\text{ЗВ}}$ : значение  $S_{\text{кон}2}$  для кривой 1 несколько меньше, чем для кривой 2. Из сравнения рис. 3, в и е следует, что при увеличении длительности импульса подсветки до  $\Delta t_{\text{лаз}} = 140$  нс (что эквивалентно увеличению отношения сигнал/шум) данный эффект не проявляется.

Качественное обсуждение целесообразно начать с рис. 3, в. При выбранном соотношении параметров системы промежуточные характерные расстояния  $S_{\text{нач-100\%}}^{\tau 2}$  и  $S_{\text{кон-100\%}}^{\tau 2}$  для сигнала (кривая 1) и множителя-свертки  $E_{\text{св}2}$  (кривая 2) совпадают. Однако величина регистрируемого сигнала  $E_2$  дополнительно зависит от пространственного множителя  $E_{\text{пр}2} = \exp(-2\sigma S_n)/S_n^2$ , в явном виде учитывающего расстояние  $S_n$ . Именно данный множитель, как отмечалось выше, приводит к тому, что значение сигнала в точке  $S_{\text{кон-100\%}}^{\tau 2}$  всегда меньше, чем в точке  $S_{\text{нач-100\%}}^{\tau 2}$ . Влияние этого множителя наглядно проявляется в диапазоне  $S_n > S_{\text{нач-100\%}}^{\tau 2}$ . Из расчетов следует, что при увеличении  $S_{\text{зад}}$  различие сигналов в точках  $S_{\text{нач-100\%}}^{\tau 2}$  и  $S_{\text{кон-100\%}}^{\tau 2}$  уменьшается.

На рис. 3, б приведена граничная ситуация, когда при уменьшении расстояния задержки до  $S_{\text{зад}}^{\text{гр}} = 20$  м значения  $S_{\text{нач-100\%}}^{\tau 2}$  для кривых 1 и 2 еще совпадают. Однако характерное расстояние  $S_{\text{кон-100\%}}^{\tau 2}$  на кривой 1 едва просматривается. При дальнейшем уменьшении  $S_{\text{зад}}$  (рис. 3, а) кривую 1 можно характеризовать только с помощью расстояния  $S_{\text{макс}}$ , соответствующего максимуму ПЭП. Промежуточные характерные расстояния  $S_{\text{нач-100\%}}^{\tau 2}$  и  $S_{\text{кон-100\%}}^{\tau 2}$  для ПЭП практически не проявляются.

На рис. 3, а приведен случай, близкий к предельному, когда ПЭП приобретает форму выпуклой сильно асимметричной кривой с очень узким максимумом на полувысоте, “прижатым” к начальной

точке ЗВ. Можно условно считать, что положение максимума  $S_{\text{макс}} = 1$  м практически совпадает с приемопередающей поверхностью АИСВ. Предельно возможное удаление  $S_{\text{макс}}$  (кривая 1) от  $S_{\text{нач-100\%}}^{T^2}$  (кривая 2) равно (при  $\Delta t_{\text{лаз}} < \Delta t_{\text{фп}}$ ):  $\Delta S_{\text{фр}}^{T^2} = c\Delta t_{\text{лаз}}/2$  [18]. Величина сигнала в пределах остальной подавляющей длины ЗВ сравнительно мала. При ясной погоде (метеорологическая дальность видимости 20 км)  $\alpha = 3.6 \cdot 10^{-5} \text{ м}^{-1}$  [2]. Рассмотрим интервал расстояний от 0.5 до 30.3 м (рис. 3, а). В пределах этого интервала  $\exp(-2\sigma S_n) \approx 1$ . В этом случае выражение для пространственного множителя принимает вид:  $E_{\text{пр2}} = 1/S_n^2$ . Поэтому ниспадающий участок кривой 1 на рис. 3, а практически подчиняется известному закону обратных квадратов [11]. Для определенности ситуацию, соответствующую расстояниям задержки  $S_{\text{зад}} < S_{\text{зад}}^{\text{TP}}$ , называем явлением отделения ПЭП от множителя-свертки (где  $S_{\text{макс}} < S_{\text{нач-100\%}}^{T^2}$ ), когда в предельном случае сравнительно узкий максимум выпуклого сильно асимметричного ПЭП смещается к началу ЗВ, соприкасающейся с приемопередающей поверхностью АИСВ (рис. 3, а). В этом случае введенные в [18] промежуточные характерные расстояния  $S_{\text{нач-100\%}}^{T^2}$  и  $S_{\text{кон-100\%}}^{T^2}$  не имеют физического смысла. Для идентификации ПЭП можно использовать только расстояние  $S_{\text{макс}}$ , соответствующее максимуму ПЭП.

Поясним более детально влияние пространственного множителя  $E_{\text{пр2}}$  на величину регистрируемого сигнала на примере сравнения рис. 3, а и в. Выше указано, что для рис. 3, а  $S_{\text{нач}}^2 = 0.5$  м,  $S_{\text{кон}}^2 = 30.3$  м. Для оценок принимаем  $\exp(-2\sigma S_n) \approx 1$ . В этом случае  $E_{\text{пр2}} \approx 1/S_n^2$ . Тогда  $E_{\text{пр2}}(0.5 \text{ м}) = 4.2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^{-2}$ ,  $E_{\text{пр2}}(30.3 \text{ м}) = 1.2 \cdot 10^{-7} \text{ м}^{-2}$ . Таким образом, в пределах длины ЗВ значение  $E_{\text{пр2}}$  уменьшается в  $3.5 \cdot 10^3$  раз. Это обусловлено тем, что в указанном диапазоне расположения ЗВ наглядно проявляется свойство функции  $E_{\text{пр2}} \approx 1/S_n^2$ , заключающееся в том, что при  $S \rightarrow 0$   $E_{\text{пр2}} \approx 1/S_n^2 \rightarrow \infty$ . Рассмотрим рис. 3, в, для которого  $S_{\text{нач}}^2 = 51.7$  м,  $S_{\text{кон}}^2 = 79.5$  м. В этом случае  $E_{\text{пр2}}(51.7 \text{ м}) = 3.9 \cdot 10^{-8} \text{ м}^{-2}$ ,  $E_{\text{пр2}}(79.5 \text{ м}) = 1.6 \cdot 10^{-8} \text{ м}^{-2}$ , т.е. в пределах длины ЗВ значение  $E_{\text{пр2}}$  уменьшается всего в 2.4 раза. Соответствующее изменение для промежуточных характерных расстояний еще меньше:  $E_{\text{пр2}}(S_{\text{нач-100\%}}^{T^2} = 60.0 \text{ м}) = 2.9 \cdot 10^{-8} \text{ м}^{-2}$ ,  $E_{\text{пр2}}(S_{\text{кон-100\%}}^{T^2} = 72.0 \text{ м}) = 2.0 \cdot 10^{-8} \text{ м}^{-2}$ . Для этих точек значения  $E_{\text{пр2}}$  отличаются всего в 1.4 раза. Отсюда следует вывод, что при увеличении расстояния задержки  $S_{\text{зад}}$  значения сигнала в точках  $S_{\text{нач-100\%}}^{T^2}$  и  $S_{\text{кон-100\%}}^{T^2}$  приближаются друг к другу. Другими словами, наблюдается тенденция сближения нормированных кривых 1 и 2 в пределах всей длины ЗВ (т. е. и при  $S_n > S_{\text{нач-100\%}}^{T^2}$ ). На рис. 3, з–е приведены аналогичные зависимости для обратного соотношения между длительностями:  $\Delta t_{\text{лаз}} > \Delta t_{\text{фп}}$ . При этом в целом наблюдается качественное совпадение поведения ПЭП при уменьшении  $S_{\text{зад}}$ . Однако в данном случае реализуется другое граничное расстояние задержки:  $S_{\text{зад}}^{\text{TP}} = 30$  м (рис. 3, д).

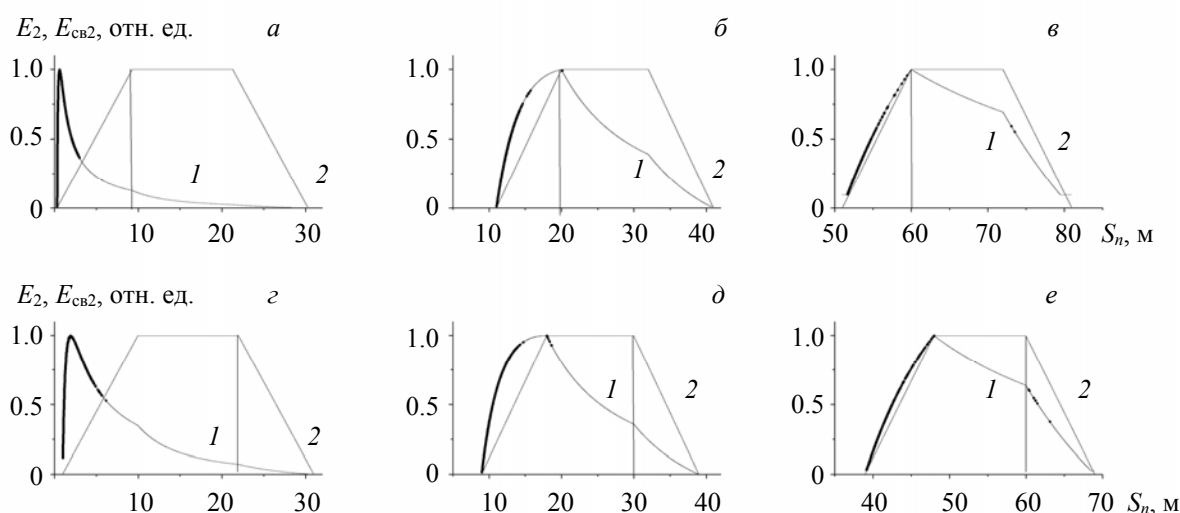


Рис. 3. Зависимости величин регистрируемого сигнала  $E_2$  (1) и множителя-свертки  $E_{\text{св2}}$  (2) для второго способа наблюдения от расстояния  $S_n$ ;  $\Delta t_{\text{лаз}} = 60$  нс,  $\Delta t_{\text{фп}} = 140$  нс (а–е);  $\Delta t_{\text{лаз}} = 140$  нс,  $\Delta t_{\text{фп}} = 60$  нс (б–з);  $S_{\text{зад}} = 9.5$  (а), 20.0 (б), 60.0 (в, е), 22.0 (з) и 30.0 м (д);  $E_{\text{макс2}} = 2.1 \cdot 10^{-9}$  (а),  $9.5 \cdot 10^{-11}$  (б),  $1.0 \cdot 10^{-11}$  (в),  $2.6 \cdot 10^{-9}$  (з),  $2.7 \cdot 10^{-10}$  (д),  $3.8 \cdot 10^{-11}$  Дж (е)

Недавно на явление отделения ПЭП от множителя-свертки обращено внимание в [20]. Для случая  $\alpha = 0$ ,  $E_{\text{ПП}} = 0$  и прямоугольной формы импульсов подсветки и стробирования получено аналитическое выражение:  $S_{\text{зад}}^{\text{TP}} = l_p + l$ , где  $l_p = c\Delta t_{\text{лаз}}/2$ ;  $l = \min(l_p, l_g)$ ;  $l_g = c\Delta t_{\text{ФП}}/2$ . В связи с явлением отделения ПЭП от множителя-свертки необходимо изменить, как указывалось выше, интерпретацию аналитических выражений, приведенных ранее в [14]. Характерные промежуточные расстояния  $S_{\text{нач-100\%}}^{\text{T2}}$  и  $S_{\text{кон-100\%}}^{\text{T2}}$  имеют физический смысл и применимы при параметрах системы, когда  $S_{\text{зад}} > S_{\text{зад}}^{\text{TP}}$ . В противном случае для описания ПЭП можно использовать только расстояние  $S_{\text{макс}}$ , соответствующее его максимуму.

Выше упоминалось, что учет  $E_{\text{ПП}}$  в ряде случаев может приводить к уменьшению длины ЗВ. На рис. 4 приведены результаты более детального исследования влияния расстояния  $S_x$  на максимальные значения сигналов  $E_{\text{макс1}}$ ,  $E_{\text{макс2}}$  и контраста сигналов  $K_{\text{макс1}}$ ,  $K_{\text{макс2}}$ , достигаемых в пределах ЗВ, а также на  $\Delta S_{\text{ЗВ1}}$ ,  $\Delta S_{\text{ЗВ2}}$ . В данном случае при первом СН расстояние  $S_x$  соответствует  $S_{\text{об}}$ , при втором —  $S_{\text{зад}}$ . При расчетах, аналогично [15], используется понятие максимального контраста сигнала:

$$K_{\text{макс}} = (E_{\text{макс}} - E_{\text{ПП}})/(E_{\text{макс}} + E_{\text{ПП}}). \quad (9)$$

На рис. 4, а—в приведены зависимости для случая  $\Delta t_{\text{лаз}} < \Delta t_{\text{ФП}}$ . Взаимное расположение ПЭП для первого и второго СН для указанного соотношения между длительностями импульсов соответствуют рис. 2, б, из которого видно, что характерные расстояния  $S_{\text{кон-100\%}}^{\text{T1}}$  для платообразного участка при первом СН (кривая 1) и  $S_{\text{нач-100\%}}^{\text{T2}}$  для второго СН (кривая 2) совпадают. По этой причине максимальные значения сигналов для обоих СН должны быть одинаковыми, что и отражено на рис. 4, а. Следствием равенства  $E_{\text{макс}}$  для обоих СН является совпадение кривых 1 и 2 на рис. 4, б. В соответствии с ранее известными результатами [15] увеличение  $S_x$  ведет к уменьшению  $E_{\text{макс}}$  и  $K_{\text{макс}}$ . На рис. 4, в видно приблизительно одинаковое уменьшение  $\Delta S_{\text{ЗВ}}$  при увеличении  $S_x$ , обусловленное учетом  $E_{\text{ПП}}$ , при этом кривая 2 расположена несколько ниже кривой 1. Это объясняется действием второго механизма уменьшения  $\Delta S_{\text{ЗВ}}$  для второго СН, понятие о котором введено при обсуждении рис. 1.

Напомним, что при  $E_{\text{ПП}} = 0$  в соответствии с [13, 14] и результатами [10] должно выполняться соотношение:  $\Delta S_{\text{ЗВ}} = c(\Delta t_{\text{лаз}} + \Delta t_{\text{ФП}})/2 = 30 \text{ м} = \text{const}$ . Из сравнения рис. 4, б и в следует, что действительно  $\Delta S_{\text{ЗВ}} \approx 30 \text{ м}$  в диапазоне, где значение  $K_{\text{макс}}$  близко к единице. В этом диапазоне влияние  $E_{\text{ПП}}$  на значения регистрируемого сигнала пренебрежимо мало.

Аналогичные зависимости параметров регистрируемого сигнала для случая  $\Delta t_{\text{лаз}} > \Delta t_{\text{ФП}}$  приведены на рис. 4, г—е, причем для обоих СН реализуется взаимное расположение ПЭП, соответствующее рис. 2, в. Необходимо обратить внимание, что для первого СН имеется платообразный участок (кривая 1), соответствующий максимальному значению  $E_{\text{макс1}}$ . При втором СН максимум сигнала  $E_{\text{макс2}}$  достигается в точке  $S_{\text{нач-100\%}}^{\text{T2}}$ . Для условий рис. 4, г максимальные значения сигналов при  $S_x = 40 \text{ м}$

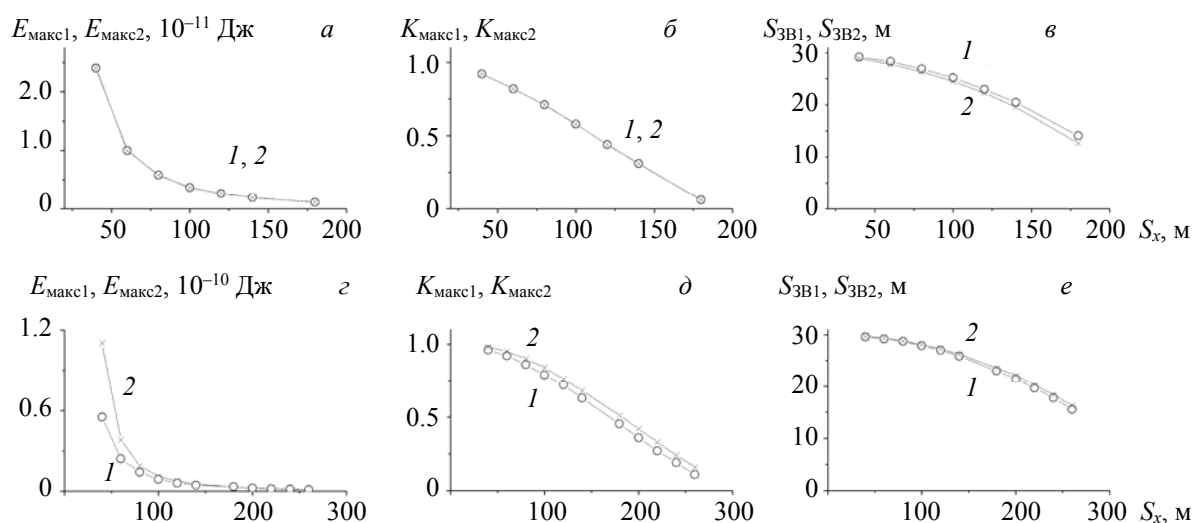


Рис. 4. Зависимости максимальных величин регистрируемых сигналов ( $E_{\text{макс}}$ ), контраста ( $K_{\text{макс}}$ ), и длины зоны видимости ( $\Delta S_{\text{ЗВ}}$ ) для первого (1) и второго (2) способов наблюдения от расстояния  $S_x$ ;  $\Delta t_{\text{лаз}} = 60 \text{ нс}$ ,  $\Delta t_{\text{ФП}} = 140 \text{ нс}$  (а—в);  $\Delta t_{\text{лаз}} = 140 \text{ нс}$ ,  $\Delta t_{\text{ФП}} = 60 \text{ нс}$  (г—е)



существенно отличаются:  $E_{\text{макс1}} = 5.5 \cdot 10^{-11}$  Дж и  $E_{\text{макс2}}(S_{\text{нач-100\%}}^{t_2}) = 1.1 \cdot 10^{-10}$  Дж. Однако по мере увеличения расстояния  $S_x$  для второго СН значения  $E_{\text{макс2}}(S_{\text{нач-100\%}}^{t_2})$  и  $E_{\text{макс2}}(S_{\text{кон-100\%}}^{t_2})$  асимптотически приближаются друг к другу. Так, при  $S_x = 100$  м различие между соответствующими значениями существенно уменьшилось:  $E_{\text{макс2}}(S_{\text{нач-100\%}}^{t_2}) = 1.1 \cdot 10^{-11}$  Дж и  $E_{\text{макс2}}(S_{\text{кон-100\%}}^{t_2}) = 8.7 \cdot 10^{-12}$  Дж. Поэтому на рис. 4, *з* при увеличении расстояния  $S_x$  кривые 1 и 2 асимптотически приближаются друг к другу (аналогичное явление рассмотрено при обсуждении рис. 3). На рис. 4, *д* контрасты  $K_{\text{макс1}}$  и  $K_{\text{макс2}}$  в окрестности  $S_x = 40$  м для кривых 1 и 2 практически не различаются, поскольку их величина соответствует предельно возможному значению. В целом поведение зависимостей на рис. 4, *з*—*е* качественно соответствует аналогичным зависимостям на рис. 4, *а*—*в*. Выполнены расчеты, аналогичные приведенным на рис. 4, для одинаковых длительностей импульсов:  $\Delta t_{\text{лаз}} = \Delta t_{\text{фп}} = 100$  нс. Результаты качественно соответствуют выводам, следующим из рис. 4. Таким образом, из рис. 4 следует, что приведенные количественные параметры ПЭП для обоих СН практически совпадают. Исключение составляет начальный участок зависимостей на рис. 4, *з*, объяснение которому дано выше. Имеются два важных с практической точки зрения отличия. Во-первых, при  $\Delta t_{\text{лаз}} \neq \Delta t_{\text{фп}}$  ЗВ частично смещены относительно друг друга, а при  $\Delta t_{\text{лаз}} = \Delta t_{\text{фп}}$  практически совпадают (рис. 2). Во-вторых, при  $\Delta t_{\text{лаз}} \neq \Delta t_{\text{фп}}$  для первого СН присутствует платообразный участок, для второго максимум ПЭП достигается только в одной точке. В некоторых случаях при наблюдении наличие платообразного участка может представлять значительный практический интерес.

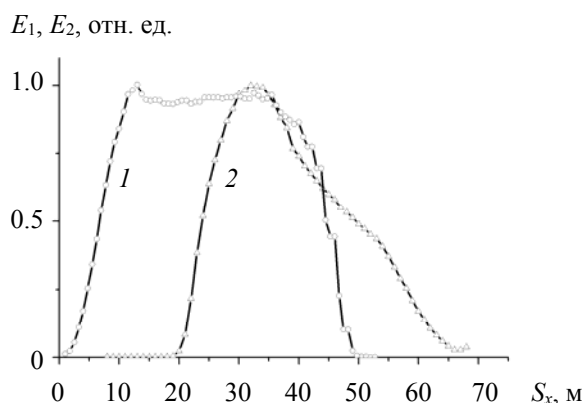


Рис. 5. Экспериментально полученные пространственно-энергетические профили зоны видимости для первого (1) и второго (2) способов наблюдения при  $\Delta t_{\text{лаз}} = 106$  нс,  $\Delta t_{\text{ЭОП}} = 225$  нс и  $S_x = 40$  м

На рис. 5 приведены ПЭП для первого и второго СН, полученные экспериментально с помощью АИСВ, в которой подсветка осуществляется импульсно-периодическим лазерным излучением длительностью  $\Delta t_{\text{лаз}} = 106$  нс с  $\lambda \approx 840$  нм. Форма импульса близка к “сглаженной трапеции”, с нарастающим по времени фронтом от нуля до  $\approx 0.8\Delta t_{\text{лаз}}$ , а затем уменьшающимся до нуля практически по линейному закону. Длительность экспозиции фотоприемника  $\Delta t_{\text{фп}} = 225$  нс, форма импульса близка к прямоугольной. Из сравнения рис. 5 и рис. 2, *б* видно качественное совпадение основных закономерностей поведения ПЭП для первого и второго СН. При первом СН расчеты и эксперимент демонстрируют наличие платообразного участка. При втором СН наблюдается наличие одного максимума. ПЭП пространственно смещены относительно друг друга. “Сглаживание” экспериментальной формы ПЭП для обоих СН (рис. 5) обусловлено отличием формы импульса подсветки от прямоугольной. В [13, 14] отмечено, что при проведении экспериментальных измерений целесообразно время задержки представлять в виде двух слагаемых:  $\Delta t_{\text{зад}} = \Delta t_{\text{зад-упр}} + \Delta t_{\text{зад-х}}$ , где  $\Delta t_{\text{зад-упр}}$  — известная временная задержка, определяемая управляющими импульсами АИСВ,  $\Delta t_{\text{зад-х}}$  — технически сложно измеряемая величина, зависящая от ряда параметров и конструкции системы. Для простоты в табл. 1 и 2 принято  $\Delta t_{\text{зад-х}} = 0$ . При учете  $\Delta t_{\text{зад-х}}$  измеренные значения  $S_{\text{нач}}$  и  $S_{\text{кон}}$  для первого и второго СН отличаются от соответствующих расстояний, вычисленных по табл. 1 и 2. На основе сравнения экспериментальных и расчетных данных получено  $\Delta t_{\text{зад-х}} \approx -33$  нс. Это означает, что для приведения в соответствие вычисляемые характерные расстояния надо уменьшить на  $\Delta S_{\text{зад-х}} \approx -5$  м. Отметим, что для АИСВ в [14] получено  $\Delta t_{\text{зад-х}} = -13$  нс, в [21]  $\Delta t_{\text{зад-х}} = -100$  нс.

**Заключение.** На основе численного моделирования выполнено сравнение особенностей формирования пространственно-энергетического профиля зон видимости для первого и второго способов наблюдения при учете энергии шумового порога  $E_{шп}$ . Подтверждено для обоих способов наблюдения, что используемое ранее в литературе соотношение, когда длина зоны видимости однозначно определяется суммой длительностей импульсов подсветки и стробирования (экспозиции фотоприемника), справедливо при условии, если максимальное значение контраста сигнала, достигаемое в пределах зоны видимости, близко к единице. Для второго способа наблюдения при уменьшении рабочих дистанций, начиная с некоторого граничного расстояния задержки, пространственно-энергетический профиль приобретает форму выпуклых асимметричных кривых с узким на полувысоте максимумом, смещенным в предельном случае в начало зоны видимости. Это объясняется преобладающим влиянием так называемого пространственного множителя на формирование пространственно-энергетического профиля. Несмотря на некоторое пространственное смещение для двух способов наблюдения пространственно-энергетических профилей относительно друг друга, если длительности импульсов подсветки  $\Delta t_{\text{лаз}}$  и стробирования  $\Delta t_{\text{фп}}$  не равны, максимальные значения регистрируемых сигналов и их контраста, а также длины зон видимости для обоих способов наблюдения при типичных параметрах в большинстве случаев практически совпадают, за исключением максимальных значений сигналов в области сравнительно малых рабочих дистанций. Для частного случая, когда длительность импульса подсветки меньше длительности строб-импульса, экспериментально получены пространственно-энергетические профили зон видимости для первого и второго способов наблюдения, которые подтверждают результаты выполненных расчетов.

- [1] **И. Л. Гейхман, В. Г. Волков.** Основы улучшения видимости в сложных условиях, Москва, ООО “Недра-Бизнесцентр” (1999)
- [2] **В. Е. Карасик, В. М. Орлов.** Лазерные системы видения, Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана (2001)
- [3] **В. Г. Волков, Б. А. Случак.** Контент, **15**, № 3 (2016) 62—70
- [4] **B. Goehler, P. Lutzmann.** Opt. Eng., **56**, N 3 (2017) 031203
- [5] **M. Laurenzis, E. Bacher.** Appl. Opt., **50**, N 21 (2011) 3824—3828
- [6] **X. Wang, Y. Cao, W. Cui, X. Liu, S. Fan, Y. Zhou, Y. Li.** Proc. SPIE, **9260** (2014) 92604L
- [7] **D. V. Alant’ev, A. V. Golitsyn, N. A. Seifi.** J. Opt. Technol., **85**, N 6 (2018) 355—358
- [8] **A. A. Golitsyn, N. A. Seyfi.** Appl. Phys., N 1 (2018) 78—83
- [9] **B. F. Kuntsevich, D. V. Shabrov.** Proc. SPIE, **11159** (2019) 1115910
- [10] **В. В. Капустин, А. К. Мовчан, Е. В. Зайцева, М. И. Курычий.** Транспортные системы и технологии, **4**, № 1 (2018) 68—83
- [11] **V. Kabashnikov, B. Kuntsevich.** Advances in Optics, Photonics, Spectroscopy and Applications: Coll. papers of the 9th Int. Conf., Ninh Binh City, Vietnam, 6—10, November 2016, Ninh Binh City (2017) 323—329
- [12] **Б. Ф. Кунцевич, Д. В. Шабров.** Журн. прикл. спектр., **89**, № 2 (2022) 260—268 [**B. F. Kuntsevich, D. V. Shabrov.** J. Appl. Spectr., **89** (2022) 308—315]
- [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. Gorobetz, 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., **82**, № 1 (2015) 68—75 [**V. A. Gorobetz, V. V. Kabanov, V. P. Kabashnikov, B. F. Kuntsevich, N. S. Metelskaya, D. V. Shabrov.** J. Appl. Spectr., **82** (2015) 68—75]
- [15] **Б. Ф. Кунцевич.** Журн. прикл. спектр., **89**, № 6 (2022) 869—877 [**B. F. Kuntsevich.** J. Appl. Spectr., **89** (2022) 869—877]
- [16] **Б. Ф. Кунцевич, Д. В. Шабров.** Журн. прикл. спектр., **89**, № 2 (2022) 260—268 [**B. F. Kuntsevich, D. V. Shabrov.** J. Appl. Spectr., **89** (2022) 260—268]
- [17] **Б. Ф. Кунцевич, В. П. Кабашников, Д. В. Шабров.** Журн. прикл. спектр., **88**, № 5 (2021) 782—790 [**B. F. Kuntsevich, V. P. Kabashnikov, D. V. Shabrov.** J. Appl. Spectr., **88** (2021) 782—790]
- [18] **O. Steinvall, H. Olsson, G. Bolander, C. Carlsson, D. Letalick.** Proc. SPIE, **3707** (1999) 432—448
- [19] **И. Н. Зайдель, Г. И. Куренков.** Электронно-оптические преобразователи, Москва, Советское радио (1970)
- [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) 137—143]
- [21] **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