

УДК 621.384.3:621.391  
EDN: VQSHIN

PACS: 42.79.Ls

**Закономерности формирования зоны видимости активно-импульсными телевизионными системами при значительном различии длительностей импульсов подсветки и экспозиции фотоприемника***Б. Ф. Кунцевич, И. Н. Пучковский, С. С. Шавель, С. Б. Бушук*

*Предложена модель формирования пространственно-энергетического профиля (ПЭП) зоны видимости для случая, когда длительность импульсов лазерной подсветки объектов значительно меньше длительности строб-импульсов (времени экспозиции) фотоприемника. Получены аналитические выражения, связывающие характерные расстояния (точки) ПЭП зоны видимости с длительностями импульсов лазерной подсветки и не регулируемой технической задержки, а также параметрами строб-импульсов при разной временной форме. Численные расчеты и эксперимент подтвердили справедливость полученных аналитических выражений. Дана интерпретация экспериментальных результатов для систем с подсветкой в области длин волн 1,57 мкм, которые не могли быть объяснены на основе использовавшихся ранее представлений. Влияние формы импульсов подсветки на значения сигнала в области фронта и спада ПЭП на основе предложенной модели объясняется тем, что регистрируемая часть длительности импульсов либо увеличивается (от 0 до 100 %), либо уменьшается (от 100 % до 0).*

*Ключевые слова:* активно-импульсная телевизионная измерительная система; зона видимости; пространственно-энергетический профиль; форма импульса подсветки; форма строб-импульса фотоприемника.

DOI: 10.51368/2307-4469-2025-13-1-30-46

**Введение**

В настоящее время активно-импульсные телевизионные измерительные системы (АИТИС) широко используются для решения

различных задач [1–8]. Кратко их принцип работы можно сформулировать следующим образом. Объект наблюдения (область интереса) освещается сравнительно короткими периодически повторяющимися лазерными импульсами, длительность которых  $\Delta t_{\text{лаз}}$  значительно меньше времени распространения света до объекта наблюдения и обратно. Приемный блок (обычно на основе электронно-оптического преобразователя (ЭОП)) синхронно включается на время  $\Delta t_{\text{фп}}$  (время экспозиции или длительность строб-импульса), но с некоторой задержкой  $\Delta t_{\text{зад}}$  относительно лазерных импульсов. ЭОП выполняет роль быстродействующего электронного затвора и усилителя яркости изображения. Для получения видеосигнала ЭОП согласуется с телевизионной камерой. АИТИС позволяют наблюдать объекты, расположенные в сравнительно узком слое

**Кунцевич Борис Федорович**, в.н.с., к.ф.-м.н.

E-mail: boris\_kuntsevich@mail.ru

**Пучковский Илья Николаевич**, н.с.**Шавель Сергей Сергеевич**, м.н.с.**Бушук Сергей Борисович**, зав. лаб., к.ф.-м.н.

ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника».

Республика Беларусь, 220072, г. Минск, пр. Независимости, 68-1.

Статья поступила в редакцию 23.01.2025

После доработки 7.02.2025

Принята к публикации 12.02.2025

Шифр научной специальности: 1.3.5

© Кунцевич Б. Ф., Пучковский И. Н., Шавель С. С.,  
Бушук С. Б., 2025

пространства (перпендикулярном оптической оси системы), называемом зоной видимости (ЗВ). Путем варьирования времени задержки  $\Delta t_{\text{зад}}$  можно изменять расстояние до ЗВ. Первоначально АИТИС предполагалось использовать для наблюдения при плохих метеороусловиях (туман, дымка, дождь и т. п.), поскольку вследствие стробирования можно «отсекать» сигнал помехи обратного рассеяния от близко расположенного слоя воздушной среды. К настоящему времени область применения таких систем значительно расширилась. АИТИС используются, например, для высокоточного определения расстояний до объектов и построения так называемых трехмерных 3D-изображений (карты глубин) [4–8]. Авторы [9, 10] предложили использовать в приемном блоке вместо ЭОП фотоприемник на основе приборов с зарядовой связью со строчным переносом и специальным режимом управления с целью удешевления и уменьшения массогабаритных параметров систем наблюдения. Новые возможности открываются в области роботизированных комплексов, дистанционно управляемых или автономных беспилотных аппаратов и т. д. при примене-

нии АИТИС, содержащих многоэлементные матричные комплементарные металл-оксид полупроводниковые (КМОП) преобразователи с произвольным доступом, выборкой светочувствительных элементов, программно-управляемыми развертками и глобальным затвором, работающих синхронно с подсветкой области интереса [11].

Можно условно выделить два способа наблюдения (СН) с помощью АИТИС [12]. В первом случае путем изменения расстояния задержки  $S_{\text{зад}} = c\Delta t_{\text{зад}}/2$  рассматривается неподвижный относительно системы объект, находящийся на фиксированном расстоянии  $S_{\text{об}}$ . Основные закономерности формирования пространственно-энергетического профиля (ПЭП) зоны видимости, т. е. зависимости величины регистрируемого АИТИС сигнала  $E$  от расстояния  $S$ , сформулированы в [13] и приведены в таблице 1. При втором СН на пульте управления устанавливается некоторое значение расстояния задержки  $S_{\text{зад}}$ . В этом случае можно наблюдать совокупность объектов, находящихся в зоне видимости на разных расстояниях, или рассматривать перемещение объектов в ЗВ [14].

Таблица 1

**Формулы для расчета характерных расстояний и длин участков [13]**

Параметр	$\Delta t_{\text{лаз}} > \Delta t_{\text{фп}}$	$\Delta t_{\text{лаз}} < \Delta t_{\text{фп}}$	$\Delta t_{\text{лаз}} = \Delta t_{\text{фп}}$
Характерные расстояния (дистанции)			
$S_{\text{нач}}^T$	$S_{\text{об}} - c(\Delta t_{\text{фп}} + \Delta t_{\text{зад-х}})/2$	$S_{\text{об}} - c(\Delta t_{\text{фп}} + \Delta t_{\text{зад-х}})/2$	$S_{\text{об}} - c(\Delta t_{\text{фп}} + \Delta t_{\text{зад-х}})/2$
$S_{\text{нач-100\%}}^T$	$S_{\text{об}} - c\Delta t_{\text{зад-х}}/2$	$S_{\text{об}} - c(\Delta t_{\text{фп}} - \Delta t_{\text{лаз}} + \Delta t_{\text{зад-х}})/2$	$S_{\text{макс}} = S_{\text{об}} - c\Delta t_{\text{зад-х}}/2$
$S_{\text{кон-100\%}}^T$	$S_{\text{об}} + c(\Delta t_{\text{лаз}} - \Delta t_{\text{фп}} - \Delta t_{\text{зад-х}})/2$		
$S_{\text{кон}}^T$	$S_{\text{об}} + c(\Delta t_{\text{лаз}} - \Delta t_{\text{зад-х}})/2$	$S_{\text{об}} + c(\Delta t_{\text{лаз}} - \Delta t_{\text{зад-х}})/2$	$S_{\text{об}} + c(\Delta t_{\text{лаз}} - \Delta t_{\text{зад-х}})/2$
Длины характерных участков			
$\Delta S_{\text{ЗВ}}^T$	$c(\Delta t_{\text{лаз}} + \Delta t_{\text{фп}})/2$	$c(\Delta t_{\text{лаз}} + \Delta t_{\text{фп}})/2$	$c(\Delta t_{\text{лаз}} + \Delta t_{\text{фп}})/2$
$\Delta S_{\text{100\%}}^T$	$c(\Delta t_{\text{лаз}} - \Delta t_{\text{фп}})/2$	$c(\Delta t_{\text{фп}} - \Delta t_{\text{лаз}})/2$	–
$\Delta S_{\text{фп}}^T$	$c\Delta t_{\text{фп}}/2$	$c\Delta t_{\text{лаз}}/2$	$c\Delta t_{\text{фп}}/2$
$\Delta S_{\text{сп}}^T$	$c\Delta t_{\text{фп}}/2$	$c\Delta t_{\text{лаз}}/2$	$c\Delta t_{\text{лаз}}/2$

С практической точки зрения для детализации (структурирования) часто вводятся так называемые характерные расстояния (точки) зоны видимости:  $S_{\text{нач}}^T$  и  $S_{\text{кон}}^T$  – начальная (ближняя) и конечная (дальняя) точки,  $S_{\text{нач-100\%}}^T$  и  $S_{\text{кон-100\%}}^T$  – начальное и конечное расстояния, ограничивающие дистанцию, где

принимается 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  $\Delta t_{\text{лаз}} < \Delta t_{\text{фп}}$ ). В публикациях [13, 14] приведены аналитические выражения для указанных

характерных расстояний для двух способов наблюдения объектов с помощью АИТИС для частного случая, когда импульсы подсветки и стробирования имеют прямоугольную временную форму. При этом рассмотрены три возможные на практике реализации для соотношения длительностей импульсов:  $\Delta t_{\text{лаз}} < \Delta t_{\text{фп}}$ ,  $\Delta t_{\text{лаз}} = \Delta t_{\text{фп}}$  и  $\Delta t_{\text{лаз}} > \Delta t_{\text{фп}}$ . Обычно для АИТИС с подсветкой в области длин волн около 840 нм максимальное различие указанных длительностей может достигать нескольких раз.

В то же время в цикле публикаций для КВИК-АИТИС с подсветкой в области длин волн 1,57 мкм (КВИК – коротковолновой инфракрасный диапазон спектра) используются типичные длительности импульсов подсветки  $\Delta t_{\text{лаз}} \approx 7,1$  нс и строб-импульсов  $\Delta t_{\text{фп}} \approx 154$  нс (например, [4, 15]). При этом отношение длительностей  $m = \Delta t_{\text{фп}}/\Delta t_{\text{лаз}} \approx 22$  сравнительно велико, что соответствует неравенству  $\Delta t_{\text{лаз}} \ll \Delta t_{\text{фп}}$ . Такое большое отличие времен обусловлено имеющейся элементной базой (т. е. используемыми лазерами подсветки и фотоприемниками). Из экспериментальных зависимостей, приведенных в обзорной работе [4], следует, что длина фронта  $\Delta S_{\text{фр}}^{\circ} \approx 4,3$  м ПЭП приблизительно в два раза меньше длины спада  $\Delta S_{\text{сп}}^{\circ} \approx 8,5$  м (индекс «э» обозначает экспериментальное значение). Этот результат не согласуется с известными представлениями для первого СН и авторами не объясняется. Например, из таблицы 1 следует, что в данном случае должно быть  $\Delta S_{\text{фр}}^{\text{т}} = \Delta S_{\text{сп}}^{\text{т}} = 1,1$  м (индекс «т» обозначает теоретическое значение, вычисленное с помощью приведенных в таблице 1 аналитических выражений), поскольку определяется меньшим из времен  $\Delta t_{\text{лаз}}$  или  $\Delta t_{\text{фп}}$ , т. е. длительностью  $\Delta t_{\text{лаз}}$ .

Для исключения влияния формы импульсов подсветки при построения 3D-изображения сцены в [16, 17] предлагается использовать два кадра. В течение первого кадра осуществляется модуляция коэффициента усиления фотоприемника (строб-импульса)  $G(t)$  по линейному [16] или экспоненциальному закону [17]. Для другого кадра  $G(t) = \text{const}$ . В этих публикациях отношение длительностей  $m$  равно 31 и 8, т. е. также сравнительно велико. Положительный результат авторы в

основном объясняют режимом накопления, поскольку приемная камера при каждом измерении интегрирует около 100 изображений. При этом не исследуется влияние формы и основных параметров ПЭП на эффективность решения поставленной задачи.

Настоящая работа посвящена исследованию для первого СН основных закономерностей формирования ПЭП зоны видимости АИТИС для случая, когда длительность импульсов подсветки значительно меньше длительности строб-импульсов (т. е.  $m \geq 10$ ). Рассматриваются случаи монотонного и не монотонного изменения коэффициента усиления фотоприемника (ЭОП) в течение строб-импульса. Подобное исследование ранее не проводилось. Как будет видно из дальнейшего, в этом случае появляются новые характерные расстояния, а некоторые ранее известные в отдельных случаях не проявляются на пространственно-энергетическом профиле зоны видимости.

### Моделирование формирования пространственно-энергетического профиля зоны видимости

В дальнейшем рассмотрение ограничим первым СН, что соответствует приведенному во введении эксперименту с КВИК-АИТИС [4, 15]. В качестве объекта наблюдения может служить плоская вертикальная стена, перпендикулярная оптической оси системы. Предполагается, что поле зрения приемного объектива полностью перекрывается освещенным лазерным излучением объектом. Аналогично [13] сделаем некоторые пояснения относительно функционирования АИТИС, необходимые при дальнейшем рассмотрении. Обычно функционирование всей системы обеспечивается контроллером, который управляет с помощью прямоугольных импульсов работой драйверов лазеров подсветки, фотоприемника и т. д. Пусть  $t_{\text{лаз-вкл}}$  и  $t_{\text{фп-вкл}}$  – моменты времени, соответствующие включению лазеров подсветки и фотоприемника, определяемые управляющими импульсами контроллера. С учетом экспериментальных данных (например, [18, 19]) следует записать, что истинные времена включения равны:

$$t_{\text{лаз-вкл}}^{\text{ист}} = t_{\text{лаз-вкл}} + \Delta t_{\text{лаз-х}} \quad \text{и} \quad t_{\text{фп-вкл}}^{\text{ист}} = t_{\text{фп-вкл}} + \Delta t_{\text{фп-х}}$$

Временные интервалы  $\Delta t_{\text{лаз-х}}$  и  $\Delta t_{\text{фп-х}}$  учитывают задержку по техническим (внутренним) причинам (передачу сигналов по внешней цепи, время реакции транзисторов на поданный сигнал и время их срабатывания и т. д.) истинных времен относительно соответствующих управляющих импульсов и обычно не известны. Тогда истинную временную задержку между передними фронтами соответствующих импульсов можно записать:  $\Delta t_{\text{зад-ист}} = \Delta t_{\text{зад-упр}} + \Delta t_{\text{зад-х}}$ , где:  $\Delta t_{\text{зад-упр}} = t_{\text{фп-вкл}} - t_{\text{лаз-вкл}}$ ,  $\Delta t_{\text{зад-х}} = \Delta t_{\text{фп-х}} - \Delta t_{\text{лаз-х}}$ . Обычно управляемая (известная) задержка  $\Delta t_{\text{зад-упр}}$  используется для вычисления расстояния задержки  $S_{\text{зад}} = c\Delta t_{\text{зад-упр}}/2$ . Внутренняя (техническая) задержка  $\Delta t_{\text{зад-х}}$  при этом в явном виде не учитывается.

Рассмотрим сейчас закономерности формирования ПЭП зоны видимости (например, на экране видеомонитора) при наблюдении вертикальной стены. При этом используем подход, предложенный ранее в [13] для первого СН. На рисунке 1 приведена схема, поясняющая основные закономерности формирования ПЭП зоны видимости, в том числе образования так называемых характерных расстояний. Вертикальная линия  $S_0$  соответствует началу отсчета расстояния и совпадает с поверхностями излучающей и приемной частей АИТИС. Ближайшая вертикальная линия  $S_{\text{фп}}$  удалена от  $S_0$  на расстояние  $S_{\text{фп}} = c\Delta t_{\text{фп}}$ . Вертикальная линия  $S_{\text{об}}$  указывает расположение объекта наблюдения и соответствует расстоянию до него. Лазерный импульс изображен в виде квадрата со стрелкой, указывающей направление его движения после отражения от объекта. Для простоты его временная форма принимается прямоугольной. Для упрощения рисунка траектории движения импульса от АИТИС к объекту не изображены. Длина импульса подсветки условно соответствует расстоянию  $S_{\text{лаз}} = c\Delta t_{\text{лаз}}$ . Во всех случаях на рисунке 1 приведено положение лазерного импульса подсветки для моментов времени  $t_{\text{фп-вкл}}^{\text{ист}}$ , соответствующих включению фотоприемника. На рисунке 1а «трапецевидная» кривая 1 условно отображает временную форму строб-импульса  $G(t)$ , которая соответствует эксперименту [4]. При этом временная трапецевидная форма «переведена» на язык пространственный. Действительно, вертикальные пунктирные линии на этом рисунке

удалены друг от друга на расстояние  $S_{\text{лаз}} = c\Delta t_{\text{лаз}}$ . Расстояние между точками 1–2 и 10–11 также равно  $S_{\text{лаз}}$ . Из рисунка следует, что в данном случае для определенности принято  $\Delta t_{\text{фп}} = 10\Delta t_{\text{лаз}}$ . На участке, ограниченном линиями 1–5, усиление  $G(t)$  возрастает по линейному закону. Окончанию фронта соответствует точка 5:  $S_{\text{фп-фр}} = 4S_{\text{лаз}}$ . Тогда момент времени, соответствующий окончанию фронта строб-импульса, равен:  $t_{\text{фп-фр}} = 4S_{\text{лаз}}/c$ . Между точками 5–9 усиление не изменяется. Началу спада  $S_{\text{фп-сп}}$  соответствует точка 9. Тогда  $t_{\text{фп-сп}} = 8S_{\text{лаз}}/c$ . Между точками 9–11 усиление уменьшается по линейному закону. Прямоугольники, расположенные слева от линии  $S_0$ , условно изображают АИТИС. Цифры в прямоугольниках указывают начальную и конечную точки (приведенные в нижней части рис. 1а) строб-импульса  $G(S)$ , в пределах которых регистрируется импульс подсветки (рис. 1б–е).

На рисунке 1а наклонная штрихпунктирная линия условно отображает случай линейного увеличения усиления  $G(t)$  (будет использовано в дальнейшем).

Предположим, что на пульте управления установлено начальное значение расстояния задержки  $S_{\text{зад}}$ , близкое к нулевому. По мере увеличения  $S_{\text{зад}}$  можно наблюдать следующую смену событий, поясняемую с помощью рисунка 1. Ситуация, изображенная на рисунке 1б, условно соответствует начальной точке зоны видимости  $S_{\text{нач}}$ . В момент включения фотоприемника  $t_{\text{фп-вкл}}^{\text{ист}}$  импульс подсветки расположен в положении 1. К моменту выключения  $t_{\text{фп-выкл}}^{\text{ист}}$  импульс переместится в положение 2. При этом фотоприемник выключится и энергия импульса подсветки не будет зарегистрирована. Из геометрии рисунка 1б для расстояния, пройденного началом лазерного импульса (положение 1) к моменту времени  $t_{\text{фп-вкл}}$ , можно записать:  $S_{\text{об}} + S_{\text{об}} - c\Delta t_{\text{фп}} = c\Delta t_{\text{зад-упр}} + c\Delta t_{\text{зад-х}}$ . Учитывая, что по определению  $c\Delta t_{\text{зад-упр}} = 2S_{\text{нач}}$ , получаем:  $S_{\text{нач}} = S_{\text{об}} - c(\Delta t_{\text{фп}} + \Delta t_{\text{зад-х}})/2$ . С увеличением  $S_{\text{зад}}$  (т. е. при перемещении от рис. 1б к рис. 1в) будет увеличиваться энергия лазерного излучения, регистрируемая фотоприемником в течение строб-импульса (поскольку будет увеличиваться длина импульса, располагаемая изна-

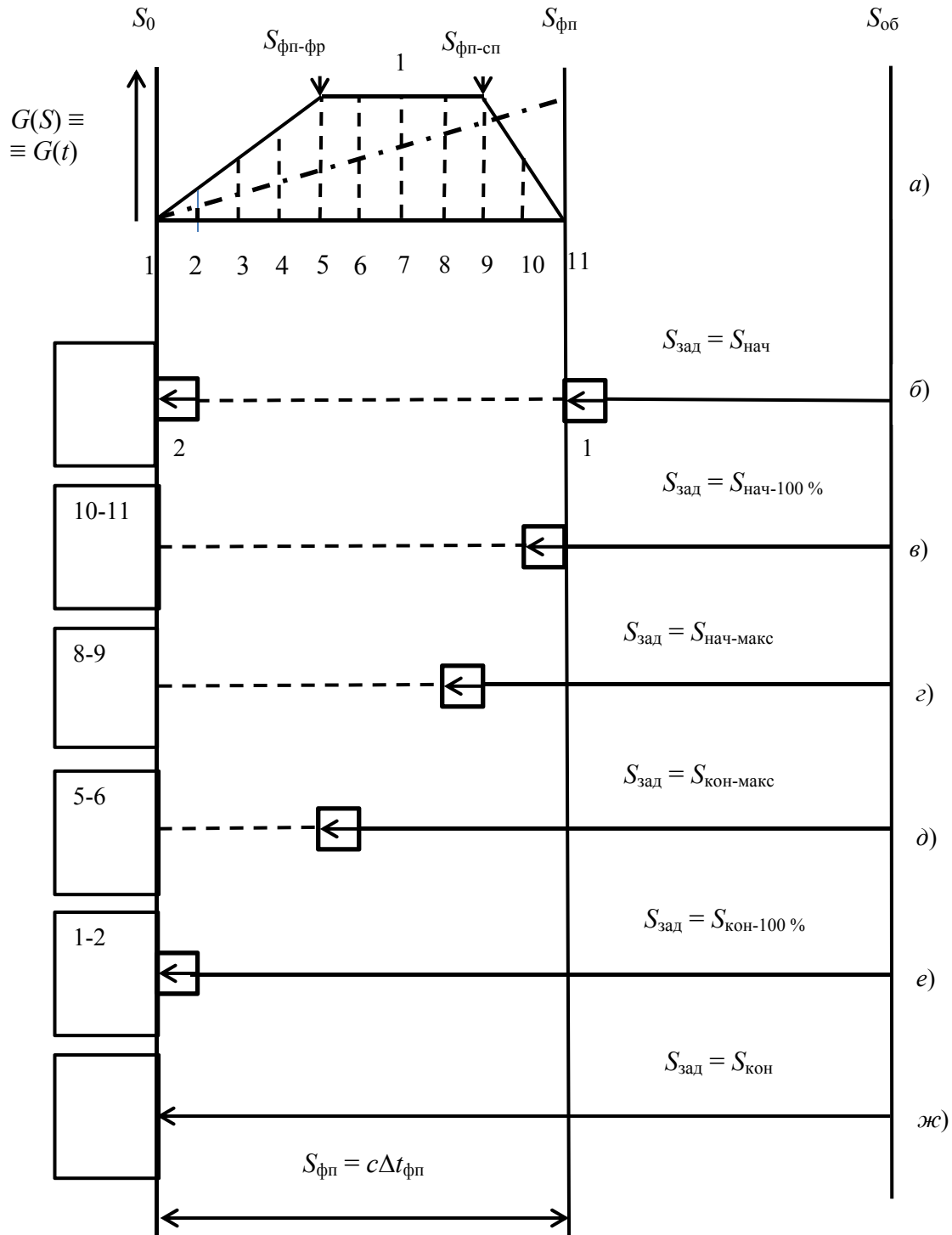


Рис. 1. Схема, поясняющая основные этапы формирования пространственно-энергетического профиля зоны видимости

начально левее линии  $S_{фп}$ ). Соответственно будет увеличиваться и яркость изображения объекта на видеомониторе. Рисунок 1в соответствует в пределе начальному расстоянию, когда в течение строб-импульса начинает регистрироваться 100 % энергии лазерного импульса. Для расстояния, прошедшего началом импульса, можно записать:  $S_{об} + S_{об} - c\Delta t_{фп} +$

$+ c\Delta t_{лаз} = c\Delta t_{зад-упр} + c\Delta t_{зад-х}$ . После учета  $c\Delta t_{зад-упр} = 2S_{нач-100\%}$ , получаем:  $S_{нач-100\%} = S_{об} - c(\Delta t_{фп} - \Delta t_{лаз} + \Delta t_{зад-х})/2$ . Из анализа указанного рисунка следует, что регистрация лазерного импульса осуществляется при уменьшении коэффициента усиления от значения  $G_{10}$ , соответствующего точке 10 на рисунке 1а, до нулевого значения  $G_{11}$  (точка 11). Для просто-

ты можно ввести некоторое среднее значение:  $G_{10-11}^{cp} = (G_{10} + G_{11})/2$ . Если за регистрацию сигнала будет отвечать интервал 9–10 строб импульса, величина сигнала возрастет за счет того, что будет выполняться неравенство:  $G_{9-10}^{cp} > G_{10-11}^{cp}$ . В конечном итоге начальной точке  $S_{нач-макс}$ , когда регистрируется максимальное значение сигнала, соответствует рисунок 1г. За регистрацию сигнала ответственен диапазон 8–9 строб-импульса. Для пройденного началом лазерного импульса расстояния можно записать:  $S_{об} + S_{об} - S_{фп-сп} + c\Delta t_{лаз} = c\Delta t_{зад-упр} + c\Delta t_{зад-х}$ . Приравняв  $c\Delta t_{зад-упр} = 2S_{нач-макс}$ , получаем:  $S_{нач-макс} = S_{об} - (S_{фп-сп} - c\Delta t_{лаз} + c\Delta t_{зад-х})/2$ . Рисунок 1д описывает ситуацию, соответствующую конечной точке максимального значения регистрируемого сигнала  $S_{кон-макс}$ . Для расстояния, пройденного началом лазерного импульса, можно записать:  $S_{об} + S_{об} - S_{фп-фр} = c\Delta t_{зад-упр} + c\Delta t_{зад-х}$ . С учетом равенства  $c\Delta t_{зад-упр} = 2S_{кон-макс}$  перепишем:  $S_{кон-макс} = S_{об} - (S_{фп-фр} + c\Delta t_{зад-х})/2$ . За регистрацию сигнала ответственен диапазон 5–6 строб-импульса. Для всех промежуточных значений расстояний задержек, ограниченных точками  $S_{нач-макс} \dots S_{кон-макс}$ , будет регистрироваться одно и тоже максимальное значение энергии  $E_{макс}$ . При дальнейшем увеличении  $S_{зад}$  величина регистрируемого сигнала будет уменьшаться вследствие уменьшения  $G^{cp}$ . На рисунке 1е изображена ситуация, соответствующая конечной точке  $S_{кон-100\%}$ , когда регистрируется 100 % энергии импульса подсветки. Исходя из рисунка, можно записать:  $S_{об} + S_{об} = c\Delta t_{зад-упр} + c\Delta t_{зад-х}$ . С учетом условия  $c\Delta t_{зад-упр} = 2S_{кон-100\%}$  перепишем выражение в виде:  $S_{кон-100\%} = S_{об} - c\Delta t_{зад-х}/2$ . В данном случае при регистрации излучения усиление фотоприемника увеличивается от значения  $G_1$  до  $G_2$ . При реализации условий, соответствующих переходу от рисунка 1д к рисунку 1е величина сигнала  $E$  будет уменьшаться, поскольку уменьшается среднее значение от  $G_{5-6}^{cp}$  до  $G_{1-2}^{cp}$ . На рисунке 1ж изображена граничная ситуация, условно соответствующая конечной точке  $S_{кон}$  зоны видимости. Можно представить, что в момент времени  $t_{фп-вкл}^{ист}$  импульс подсветки находится внутри прямоугольника, изображающего АИТИС. При этом конец импульса совпадает

с линией  $S_0$ . Строб-импульс уже выключен и сигнал не регистрируется. При  $S_{зад} \geq S_{кон}$  сигнал также не будет регистрироваться. Из рисунка следует:  $S_{об} + S_{об} + c\Delta t_{лаз} = c\Delta t_{зад-упр} + c\Delta t_{зад-х}$ . Учитывая равенство  $c\Delta t_{зад-упр} = 2S_{кон}$ , перепишем выражение:  $S_{кон} = S_{об} + (c\Delta t_{лаз} - c\Delta t_{зад-х})/2$ .

В таблице 2 приведены полученные аналитические выражения, которые определяют связь характерных расстояний  $S_{нач}^T$ ,  $S_{нач-макс}^T$ ,  $S_{кон-макс}^T$ ,  $S_{нач-100\%}^T$ ,  $S_{кон-100\%}^T$  и  $S_{кон}^T$  с интервалами времени  $\Delta t_{лаз}$ ,  $\Delta t_{фп}$ ,  $t_{фп-фр} = S_{фп-фр}/c$ ,  $t_{фп-сп} = S_{фп-сп}/c$ ,  $\Delta t_{зад-х}$  и расстоянием  $S_{об}$ . Как будет видно из дальнейших расчетов, в некоторых случаях отдельные характерные расстояния не проявляются. Используя указанные соотношения, можно записать выражения для длин зоны видимости  $\Delta S_{ЗВ}^T = S_{кон}^T - S_{нач}^T$ , центрального участка  $\Delta S_{ЦУ}^T = S_{кон-макс}^T - S_{нач-макс}^T$ , фронта  $\Delta S_{фр}^T = S_{нач-макс}^T - S_{нач}^T$ , спада  $\Delta S_{сп}^T = S_{кон}^T - S_{кон-макс}^T$ , а также  $\Delta S_{фр-100\%}^T = S_{нач-100\%}^T - S_{нач}^T$  и  $\Delta S_{сп-100\%}^T = S_{кон}^T - S_{кон-100\%}^T$ . Для удобства дальнейшего рассмотрения с учетом выполненных ниже расчетов в таблице 2 отдельно сгруппированы длины характерных участков, реализуемых при не монотонном (трапециевидном) и монотонном (линейном или экспоненциальном) изменениях коэффициента усиления фотоприемника  $G(t)$  (в том числе при  $G(t) = const$ ). Следует обратить внимание, что возможно решение и обратной задачи. Можно определить расстояние до объекта  $S_{об}$  по зарегистрированным экспериментально (индекс «э»), например, величинам  $S_{нач}^э$ ,  $S_{нач-макс}^э$ ,  $S_{кон-макс}^э$  и  $S_{кон}^э$ , если известны временные интервалы  $\Delta t_{лаз}$ ,  $\Delta t_{фп}$ ,  $t_{фп-фр}$ ,  $t_{фп-сп}$  и  $\Delta t_{зад-х}$ .

Выше рассмотрена ситуация, когда начальное значение  $S_{зад}$  близко к нулевому. Однако на практике часто реализуются противоположные случаи, соответствующие сравнительно большому начальному значению  $S_{зад}$ . Выполненное дополнительное рассмотрение показало, что при уменьшении  $S_{зад}$  наблюдается смена событий в обратном порядке: последовательное перемещение от точки  $S_{кон}^T$  к точке  $S_{нач}^T$  (остаются справедливыми выражения таблицы 2).

Таблица 2

## Формулы для расчета характерных расстояний и длин характерных участков

Параметр	Выражение
Характерные расстояния (дистанции)	
$S_{\text{нач}}^T$	$S_{\text{об}} - c(\Delta t_{\text{фп}} + \Delta t_{\text{зад-х}})/2$
$S_{\text{нач-100\%}}^T$	$S_{\text{об}} - c(\Delta t_{\text{фп}} - \Delta t_{\text{лаз}} + \Delta t_{\text{зад-х}})/2$
$S_{\text{нач-макс}}^T (S_{\text{фр}}^T)$	$S_{\text{об}} - c(t_{\text{фп-сп}} - \Delta t_{\text{лаз}} + \Delta t_{\text{зад-х}})/2$
$S_{\text{кон-макс}}^T (S_{\text{сп}}^T)$	$S_{\text{об}} - c(t_{\text{фп-фр}} + \Delta t_{\text{зад-х}})/2$
$S_{\text{кон-100\%}}^T$	$S_{\text{об}} - c\Delta t_{\text{зад-х}}/2$
$S_{\text{кон}}^T$	$S_{\text{об}} + c(\Delta t_{\text{лаз}} - \Delta t_{\text{зад-х}})/2$
Длины характерных участков при трапецевидном (не монотонном) изменении коэффициента усиления фотоприемника	
$\Delta S_{\text{ЗВ}}^T = S_{\text{кон}}^T - S_{\text{нач}}^T$	$c(\Delta t_{\text{лаз}} + \Delta t_{\text{фп}})/2$
$\Delta S_{\text{ЦУ}}^T = S_{\text{кон-макс}}^T - S_{\text{нач-макс}}^T$	$c(t_{\text{фп-сп}} - t_{\text{фп-фр}} - \Delta t_{\text{лаз}})/2$
$\Delta S_{\text{фр}}^T = S_{\text{фр}}^T - S_{\text{нач}}^T$	$c(\Delta t_{\text{лаз}} + \Delta t_{\text{фп}} - t_{\text{фп-сп}})/2$
$\Delta S_{\text{сп}}^T = S_{\text{кон}}^T - S_{\text{сп}}^T$	$c(\Delta t_{\text{лаз}} + t_{\text{фп-фр}})/2$
Длины характерных участков при монотонном изменении (линейном или экспоненциальном) коэффициента усиления фотоприемника или его фиксированном значении	
$\Delta S_{\text{ЗВ}}^T = S_{\text{кон}}^T - S_{\text{нач}}^T$	$c(\Delta t_{\text{лаз}} + \Delta t_{\text{фп}})/2$
$\Delta S_{\text{ЦУ-100\%}}^T = S_{\text{кон-100\%}}^T - S_{\text{нач-100\%}}^T$	$c(\Delta t_{\text{фп}} - \Delta t_{\text{лаз}})/2$
$\Delta S_{\text{фр-100\%}}^T = S_{\text{нач-100\%}}^T - S_{\text{нач}}^T$	$c\Delta t_{\text{лаз}}/2$
$\Delta S_{\text{сп-100\%}}^T = S_{\text{кон}}^T - S_{\text{кон-100\%}}^T$	$c\Delta t_{\text{лаз}}/2$

## Исходные выражения для расчетов и предположения

Для расчета зависимости величины энергии регистрируемого сигнала  $E$  от расстояния задержки  $S_{\text{зад}}$  (т. е. ПЭП) при первом СН можно использовать выражение (например, [20]):

$$E = E_0 S_{\text{об}}^{-2} \exp(-2\alpha S_{\text{об}}) \times \int L(t - 2S_{\text{об}}/c) G(t - \Delta t_{\text{зад}}) dt, \quad (1)$$

где  $E_0 = (\rho/\pi)A_{\text{пр}}\eta_{\text{пр}}\eta_{\text{под}} = 0,19 \text{ м}^2$  – константа, не зависящая от  $S_{\text{об}}$  (здесь:  $\rho$  – коэффициент

отражения объекта;  $A_{\text{пр}}$  – эффективная площадь приемной апертуры;  $\eta_{\text{пр}}$  и  $\eta_{\text{под}}$  – коэффициенты спектрального пропускания приемного блока и блока подсветки;  $S_{\text{об}}$ , м – расстояние до объекта;  $\alpha$ ,  $\text{м}^{-1}$  – показатель ослабления лазерного излучения в атмосфере;  $t$ , с – время;  $c$ , м/с – скорость света;  $\Delta t_{\text{зад}}$ , с – время задержки;  $L$ , Вт и  $G$  – функции, описывающие временные зависимости мощности излучения лазерной подсветки и чувствительности (безразмерного коэффициента усиления) приемного блока (строб-импульса).

При трапецевидной форме строб-импульса (рис. 1а; кривая 1) можно записать:

$$G(t - \Delta t_{\text{зад}}) = G_{\text{макс}} \times \begin{cases} t/t_{\text{фп-фр}}, & \text{если } 0 \leq t < t_{\text{фп-фр}} \\ 1, & \text{если } t_{\text{фп-фр}} \leq t \leq t_{\text{фп-сп}} \\ ((\Delta t_{\text{фп}} - t)/(\Delta t_{\text{фп}} - t_{\text{фп-сп}})), & \text{если } t_{\text{фп-сп}} < t \leq \Delta t_{\text{фп}} \end{cases} \quad (2)$$

При обсуждении рисунка 1 указывалось, что  $t_{\text{фп-фр}} = S_{\text{фп-фр}}/c$ ,  $t_{\text{фп-сп}} = S_{\text{фп-сп}}/c$ . Значение  $G_{\text{макс}}$  соответствует максимальной величине усиления, которая реализуется в области платообразного участка (рис. 1а; кривая 1).

Следует отметить, что в АИТИС существует, так называемый, шумовой порог [2]. Это означает, что даже в отсутствие входного излучения в приемном канале присутствует сигнал, соответствующий шумовому порогу. Поставим ему в соответствие, аналогично [20, 21], некоторое значение энергии шумового порога  $E_{\text{шп}}$ . В дальнейшем при вычислении величины сигнала  $E$  при использовании выражения (1) будем учитывать, что значение  $E$  не может быть меньше  $E_{\text{шп}}$ . Это означает, что все полученные при расчетах значения  $E$ , меньшие  $E_{\text{шп}}$ , заменяются на  $E_{\text{шп}}$ .

### Результаты расчетов и их обсуждение

Для проверки правильности предложенной модели и полученных аналитических выражений, приведенных в таблице 2, а также объяснения экспериментальных зависимостей [4] проведены численные расчеты.

Для расчетов с помощью выражения (1) была разработана специальная программа, основанная на предложенной в предыдущем разделе модели формирования ПЭП зоны видимости. Она учитывает наличие всех характерных расстояний, приведенных в таблице 2. При этом принимаются во внимание физические процессы, сопутствующие каждому характерному расстоянию, а также учитывается возможное изменение (не изменение) их вклада при передвижении между характерными расстояниями. Принципиальное значение имеет использование установленного факта, что формирование ПЭП (при перемещении от начальной точки зоны видимости к конечной) определяется изменением величины коэффициента усиления фотоприемника в обратном порядке: от его конца к началу. В упрощенном виде выражение для мощности лазерной подсветки можно записать следующим образом:  $L = P_{\text{лаз1}} N_{\text{лаз}} \Delta t_{\text{лаз}} f_{\text{лаз-част}} f(\Omega_{\text{лаз}}) f_{\text{лаз-форм}}$ , где  $P_{\text{лаз1}}$  – амплитуда мощности излучения одного лазера;  $N_{\text{лаз}}$  – число лазеров в блоке подсветки;  $\Delta t_{\text{лаз}}$  – длительность лазерного импульса;  $f_{\text{лаз-част}}$  – частота следования лазерных импуль-

сов;  $f(\Omega_{\text{лаз}}) \geq 1$  – множитель, учитывающий угловую расходимость излучения подсветки;  $f_{\text{лаз-форм}}$  – множитель, учитывающий временную форму импульса подсветки. Поскольку выражение для  $L$  содержит много множителей, подбиралось такое его значение, чтобы максимальная величина регистрируемой в пределах ЗВ энергии  $E_{\text{макс}}$ , по крайней мере, на один – два порядка превышала энергию шумового порога  $E_{\text{шп}}$ . Такой подход не влияет на общность основных полученных результатов. Значения остальных параметров: длина волны излучения лазерной подсветки равна 1,57 мкм; максимальное значение (амплитуда) коэффициента усиления приемного блока равно 40000; метеорологическая дальность видимости 20 км. В работе [22] указывается, что для ЭОП 3-го поколения энергия, эквивалентная шуму, составляет  $E_{\text{ЭОП}} = 6 \times 10^{-20}$  Дж/пиксель. Учитывая, что современные ЭОП могут содержать  $\sim 1 \times 10^8$  и более микро каналов [23], при расчетах за основу принято значение:  $E_{\text{шп}} = 1 \times 10^{-13}$  Дж. В ряде случаев для простоты полагается  $\Delta t_{\text{зад-х}} = 0$ . В тексте даются пояснения по используемым формам импульсов подсветки и стробирования.

На рисунке 2 приведены результаты расчетов особенностей формирования ПЭП для КВИК-АИСВ с параметрами, близкими к экспериментальным [4]:  $\Delta t_{\text{лаз}} = 7$  нс;  $\Delta t_{\text{фп}} = 154$  нс;  $S_{\text{об}} = 95$  м. Кривые 1, 2 и 3 соответствуют разным значениям коэффициентов отражения объектов  $\rho_{\text{об}}$ , которые использовались в цитируемой публикации:  $\rho_{\text{об}} = 0,2$  (1); 0,5 (2) и 0,9 (3). Форма строб-импульсов выбиралась трапецевидной (аналогично рис. 1а, кривая 1) с учетом выражения (2). Первоначально рассмотрим рисунок 2а с целью сопоставления результатов расчетов с экспериментом. Здесь и далее вертикальные линии на рисунках 2 и 3 указывают расположение промежуточных характерных расстояний  $S_{\text{нач-макс}}$  и  $S_{\text{кон-макс}}$ . В данном случае:  $S_{\text{нач-макс}} = 91,7$  м и  $S_{\text{кон-макс}} = 101,2$  м. Отметим, что при построении рисунка 2а использовалось два неизвестных «подгоночных» параметра. Первый из них: выбор значения  $\Delta t_{\text{зад-х}} = -97$  нс для реализации оптимального совпадения абсолютных значений экспериментальных и вычисленных характерных расстояний  $S_{\text{нач}}$ ,  $S_{\text{нач-макс}}$ ,  $S_{\text{кон-макс}}$



и  $S_{\text{кон}}$ . Второй параметр: это подбор величин  $n_{\text{фп-фр}} = t_{\text{фп-фр}}/\Delta t_{\text{лаз}}$  и  $n_{\text{фп-сп}} = t_{\text{фп-сп}}/\Delta t_{\text{лаз}}$ , позволяющих приблизиться к экспериментально реализованным значениям для длин фронта и спада ПЭП:  $\Delta S_{\text{фр}}^{\text{э}} = 4,3$  м и  $\Delta S_{\text{сп}}^{\text{э}} = 8,5$  м (здесь и далее индекс «э» обозначает экспериментальное значение, а индекс «р» – полученное

путем расчетов с использованием разработанной программы). При использовании подгочных параметров  $n_{\text{фп-фр}} = 8$  и  $n_{\text{фп-сп}} = 4$  (или  $\Delta t_{\text{фп-фр}} = 56$  нс и  $\Delta t_{\text{фп-сп}} = 28$  нс) получено (рис. 2а):  $\Delta S_{\text{фр}}^{\text{р}} = 4,6$  м и  $\Delta S_{\text{сп}}^{\text{р}} = 8,6$  м. Видно, что экспериментальные и рассчитанные значения практически совпадают.

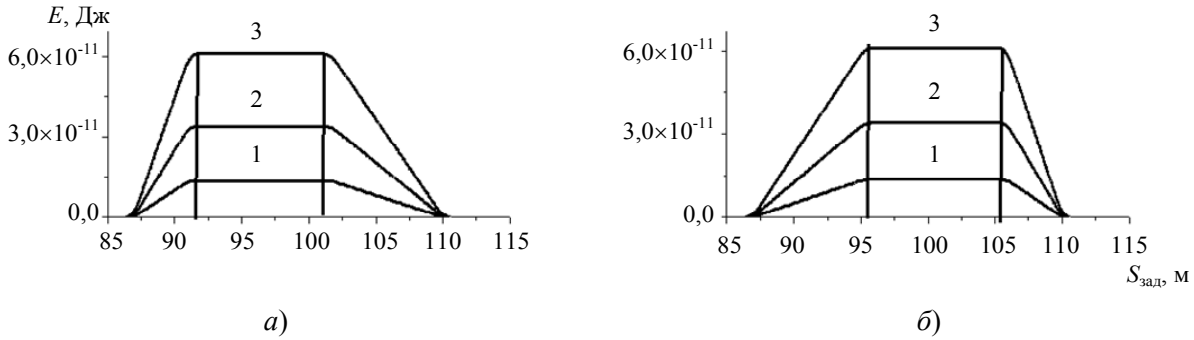


Рис. 2. Зависимости величин регистрируемого сигнала  $E$  от расстояния задержки  $S_{\text{зад}}$  при  $\Delta t_{\text{лаз}} = 7$  нс;  $\Delta t_{\text{фн}} = 154$  нс;  $S_{\text{об}} = 95$  м; (1) –  $\rho_{\text{об}} = 0,2$ ; (2) –  $\rho_{\text{об}} = 0,50$ ; (3) –  $\rho_{\text{об}} = 0,9$  (3); а) –  $n_{\text{фп-фр}} = 8$ ;  $n_{\text{фп-сп}} = 4$ ; б) –  $n_{\text{фп-фр}} = 4$ ;  $n_{\text{фп-сп}} = 8$

Анализ показывает, что основные выводы и качественные закономерности, следующие из рисунка 2а, идентичны экспериментальным результатам [4]. Разница только в том, что в [4] результаты приведены для пяти значений  $\rho_{\text{об}}$ , а при расчетах – для трех.

В таблице 3 для сравнения приведены характерные расстояния (точки), а также длины зон видимости  $\Delta S_{\text{ЗВ}}$ , фронта  $\Delta S_{\text{фр}}$ , центрального участка  $\Delta S_{\text{ЦУ}}$  и спада  $\Delta S_{\text{сп}}$  экспериментальные (столбец 2) и рассчитанные при подобранных значениях  $n_{\text{фп-фр}} = 8$ ,  $n_{\text{фп-сп}} = 4$ , и  $\Delta t_{\text{зад-х}} = -97$  нс (столбец 3), а также для  $\Delta t_{\text{зад-х}} = 0$  (столбец 4). Поясним, что экспериментальные данные 2-го столбца определялись из обзорной публикации [4] рис. 27. Из сравнения абсолютных значений расстояний  $S_{\text{нач}}$ ,  $S_{\text{нач-макс}}$ ,  $S_{\text{кон-макс}}$  и  $S_{\text{кон}}$  (в обобщенном виде  $S_i^{\text{э}}$  и  $S_i^{\text{р}}$ ), приведенных в столбцах 2 и 4, следует, что необходимо учитывать параметр  $\Delta t_{\text{зад-х}}$ . Поэтому в столбце 3 приведены результаты расчетов при подобранном значении  $\Delta t_{\text{зад-х}} = -97$  нс, соответствующем оптимальному совпадению экспериментальных и рассчитанных абсолютных значений расстояний. В тоже время сравнение значений 2, 3 и 4 столбцов для величин  $\Delta S_{\text{ЗВ}}$ ,  $\Delta S_{\text{фр}}$ ,  $\Delta S_{\text{ЦУ}}$  и  $\Delta S_{\text{ЗВ}}$  показывает их практическое совпадение. Это объясняется тем, что добавки к абсолютным значениям

расстояний, обусловленные вкладом  $\Delta t_{\text{зад-х}} = -97$  нс, при нахождении разности соответствующих величин, взаимно компенсируются. Используя значение  $\Delta t_{\text{зад-х}}$  можно вычислить расстояние:  $\Delta S_{\text{зад-х}} = c\Delta t_{\text{зад-х}}/2 = S_i^{\text{т}} - S_i^{\text{э}} \approx -14,5$  м. Для сведения укажем, что ранее в литературе было получено для разных АИТИС:  $\Delta t_{\text{лаз-х}} = 100$  нс [24], 85 нс [25] и  $\Delta t_{\text{зад-х}} = -28$  нс [13].

Как и следовало ожидать, при увеличении коэффициента отражения объекта  $\rho_{\text{об}}$ , максимальные значения регистрируемого сигнала  $E_{\text{макс}}$  также возрастают (рис. 2). Анализ показывает качественное соответствие экспериментальных данных и расчетных при изменении  $\rho_{\text{об}}$ .

Рисунок 2б демонстрирует влияние параметров строб-импульса на значения промежуточных характерных расстояний ПЭП зоны видимости. Для него значения строб-импульса  $n_{\text{фр}}$  и  $n_{\text{сп}}$  «поменялись местами» (по сравнению с рис. 2а) и равны:  $n_{\text{фр}} = 4$  и  $n_{\text{сп}} = 8$ . При этом в соответствии с пояснениями, сделанными при обсуждении рисунка 1, «поменялись местами» длины фронта и спада для ПЭП. Для рисунка 2,б получено:  $\Delta S_{\text{фр}}^{\text{р}} = 8,6$  м и  $\Delta S_{\text{сп}}^{\text{р}} = 4,8$  м.

Таблица 3

## Экспериментальные и вычисленные характерные расстояния и длины

Параметры	[4]	Расчет при $\Delta t_{\text{зад-х}} = -97$ нс	Расчет при $\Delta t_{\text{зад-х}} = 0$
1	2	3	4
$S_{\text{нач}}$ ; М	86,5	86,6	72,1
$S_{\text{нач-макс}}$ ; М	90,8	91,4	76,9
$S_{\text{кон-макс}}$ ; М	101,5	101,6	87,0
$S_{\text{кон}}$ ; М	110	110,4	95,8
$\Delta S_{\text{ЗВ}}$ ; М	23,5	23,7	23,7
$\Delta S_{\text{фр}}$ ; М	4,3	4,8	4,8
$\Delta S_{\text{Гу}}$ ; М	10,7	10,1	10,1
$\Delta S_{\text{сп}}$ ; М	8,5	8,8	8,8

Хорошее соответствие экспериментальных результатов и расчетов свидетельствует о правильности предложенной модели формирования пространственно-энергетического профиля зоны видимости и приведенных в таблице 2 аналитических выражений. Однако на рисунке 2 отсутствуют ранее наблюдавшиеся (например, [13, 14]) характерные расстояния  $S_{\text{нач-100\%}}$  и  $S_{\text{кон-100\%}}$  при фиксированных в течение строб-импульса значениях усиления  $G = \text{const}$ . Анализ показывает, что в данном случае уменьшение сигнала  $E$  на интервалах  $\Delta S_{\text{фр-100\%}}$  и  $\Delta S_{\text{сп-100\%}}$ , обусловленное уменьшением регистрируемой длительности импульса подсветки в пределах сравнительно небольшого интервала  $\Delta t_{\text{лаз}}$  (рис. 1), пренебрежимо мало по сравнению с величиной, определяемой изменением  $G(t)$ .

Анализ рисунков 1 и 2 позволяет сделать следующие выводы. Условно можно считать, что при увеличении расстояния задержки лазерный импульс «прописывает» форму строб-импульса, передвигаясь от его конца к началу. В этом случае формирование фронта ПЭП обусловлено увеличением  $G(t)$  при перемещении от конца строб импульса к точке  $S_{\text{фп-сп}}$ . Наличие горизонтального участка ПЭП и его длина однозначно «связаны» с соответствующим участком строб-импульса. Спад ПЭП объясняется уменьшением усиления при передвижении от точки  $S_{\text{фп-фр}}$  к началу строб-импульса. По экспериментально зарегистрированному ПЭП можно определить не только форму строб-импульса, но также длительности фронта и спада. При этом, чем больше

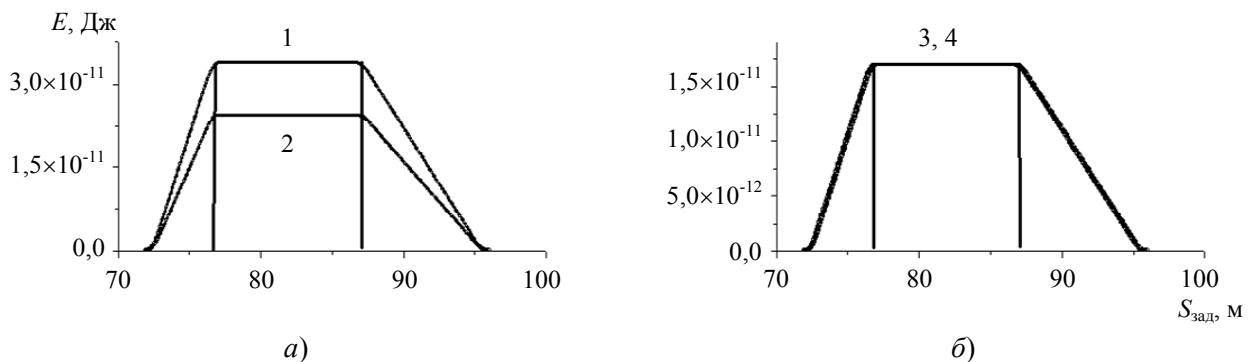
отношение  $m = \Delta t_{\text{фп}}/\Delta t_{\text{лаз}}$ , тем точнее ПЭП воспроизводит форму строб-импульса.

Для выяснения степени влияния формы импульсов лазерной подсветки на основные параметры ПЭП на рисунке 3 приведены результаты соответствующих расчетов. На рисунке 3а кривая 1 получена для прямоугольной формы импульсов подсветки, а кривая 2 – для «асимметричной квазикоколообразной» формы с максимумом при  $t_{\text{макс}} \approx 0,8\Delta t_{\text{лаз}}$ , близкой к одной из экспериментальных реализаций. На рисунке 3б используется треугольная форма импульсов: для кривой 3  $\beta_{\text{фр}} = 0,8$ ;  $\beta_{\text{сп}} = 0,2$ ; а для кривой 4:  $\beta_{\text{фр}} = 0,2$ ;  $\beta_{\text{сп}} = 0,8$ . Значения  $\beta_{\text{фр}}$  и  $\beta_{\text{сп}}$  равны отношению длин проекций фронта (левой стороны) и спада (правой стороны) к длине основания треугольника (для треугольника  $\beta_{\text{фр}} + \beta_{\text{сп}} = 1$ ). Из рисунка 3 следует, что изменение формы импульсов подсветки при  $m = 22$  не оказывает влияния на значения характерных расстояний и ход зависимостей  $E(S_{\text{зад}})$ . Исключение составляет кривая 1, для которой достигается максимальное значение сигнала, вследствие чего кривые для ПЭП «расходятся». Это объясняется известным фактом, что при фиксированных значениях длительности импульса подсветки  $\Delta t_{\text{лаз}}$  и его амплитуды максимальной регистрируемой энергии соответствует прямоугольная форма импульса подсветки. С практической точки зрения важно, что при этом не изменяются значения промежуточных характерных расстояний  $S_{\text{нач-макс}}$  и  $S_{\text{кон-макс}}$ . Для рисунка 3 они одинаковые для всех кривых:  $S_{\text{нач-макс}} = 77$  м и  $S_{\text{кон-макс}} = 87$  м. Кроме

того, эти величины совпадают с рассчитанными на основании аналитических выражений, приведенных в таблице 2. Ранее [26] для случая  $\Delta t_{\text{лаз}} \leq \Delta t_{\text{фп}}$  также было установлено, что форма импульса подсветки не оказывает влияния на значения характерных расстояний. Объясняется это тем, что приемным блоком в течение строб-импульса регистрируется вся энергия лазерного импульса, которая не зависит от его формы. Анализ рисунка 1 подтверждает сказанное. Таким образом, промежуточные характерные расстояния  $S_{\text{нач-макс}}$  и  $S_{\text{кон-макс}}$ , позволяющие «структурировать» длину зоны видимости и тем самым указывают

диапазон расстояний до объектов, которые расположены в пределах фронта, центрального участка или спада ПЭП.

Для полноты картины были проведены расчеты, аналогичные приведенным на рисунках 2 и 3, для строб-импульса треугольной формы. В первом случае вершина треугольника была смещена к началу основания ( $n_{\text{фп-фр}} = 4$  и  $n_{\text{фп-сп}} = 18$ ; для треугольника  $n_{\text{фп-фр}} + n_{\text{фп-сп}} = \Delta t_{\text{фп}} / \Delta t_{\text{лаз}} = 22$ ), а во втором – к его окончанию ( $n_{\text{фп-фр}} = 18$  и  $n_{\text{фп-сп}} = 4$ ). Полученные результаты качественно совпадают с результатами, которые сформулированы при обсуждении рисунков 2 и 3.



**Рис. 3.** Зависимости величин регистрируемого сигнала  $E$  от расстояния задержки  $S_{\text{зад}}$  при  $\Delta t_{\text{лаз}} = 7$  нс;  $\Delta t_{\text{фп}} = 154$  нс;  $S_{\text{об}} = 95$  м;  $n_{\text{фп-фр}} = 8$ ;  $n_{\text{фп-сп}} = 4$ ; а) – (1) – форма импульсов подсветки прямоугольная; (2) – форма импульсов подсветки, реализованная экспериментально; б) – (3) – форма импульсов подсветки трапециевидная с параметрами  $\beta_{\text{фр}} = 0,8$ ;  $\beta_{\text{сп}} = 0,2$ ; (4) – форма импульсов подсветки треугольная с параметрами  $\beta_{\text{фр}} = 0,2$ ;  $\beta_{\text{сп}} = 0,8$

На рисунках 2 и 3 приведены результаты расчетов для трапециевидной формы строб-импульсов, что соответствует эксперименту [4]. В ряде публикаций (например, [5, 6]) для получения 3D-изображений объектов используются методы, основанные на прямоугольной форме импульсов подсветки и стробирования. Однако на практике это требование не всегда удается реализовать. Во введении отмечалось, что в АИТИС с лазерной подсветкой на длинах волн в области 532 нм и 808 нм для исключения влияния формы лазерных импульсов подсветки при трехмерной реконструкции сцены предложено использовать два кадра [16, 17]. Один кадр регистрируется при постоянном значении усиления  $G_1 = \text{const}$ , а в течение другого усиление  $G_2(t)$  изменяется по линейному [16] или экспоненциальному [17] закону. Расстояние до элемента объекта  $S$ , м, которому соответствует определенный пик-

сель фотоприемника, определяется с помощью выражения [16]:

$$S = S_0 + \alpha(E_2 / E_1 - \beta), \quad (3)$$

где  $E_1$ , Дж и  $E_2$ , Дж – сигналы, регистрируемые при первом и втором кадрах;  $S_0$ , м – начальное расстояние, определяемое параметрами системы;  $\alpha$ , м и  $\beta$  (безразмерная величина) – вычисляемые константы.

Отличительной особенностью подходов [16, 17] является монотонный характер поведения усиления в пределах длительности строб-импульса  $\Delta t_{\text{фп}}$ : усиление либо не изменяется, либо увеличивается по линейному или экспоненциальному закону. Закономерности формирования ПЭП для этих случаев не исследованы и поясняются на рисунке 4 для разных форм импульсов подсветки и стробирования. Отметим, что на рисунках 4а и 4б

вертикальные линии соответствуют проявляющимся промежуточным характерным состояниям  $S_{нач-100\%}^T$  и  $S_{кон-100\%}^T$  (таблица 2). Например, для рисунка 4а:  $S_{нач-100\%}^P = 350$  м и  $S_{кон-100\%}^P = S_{об} = 800$  м.

Для рисунка 4а выбраны параметры, соответствующие эксперименту [16]:  $\Delta t_{лаз} = 100$  нс,  $\Delta t_{фп} = 3100$  нс и  $S_{об} = 800$  м ( $m = 31$ ). Для полноты картины и возможности сравнения результаты приведены для двух случаев для  $G(t)$ : 1)  $G = const = 40000$  (кривые 1 и 2); 2) линейное увеличение  $G(t)$  при начальном значении  $G_{нач} = 20000$  и конечном –  $G_{кон} = 40000$  (кривые 3, 4 и 5). При этом формы импульсов подсветки треугольные с разными параметрами:  $\beta_{фр} = 0,2$ ;  $\beta_{сп} = 0,8$  (кривые 1 и 3) и  $\beta_{фр} = 0,8$ ;  $\beta_{сп} = 0,2$  (кривые 2 и 4); т. е. длительности фронта и спада «меняются местами». Из сравнения кривых 1 и 2, а также кривых 3 и 4 видно, что форма импульсов подсветки не оказывает влияния на параметры центральной (т. е. без учета фронта и спада) части ПЭП. Исключение составляет кривая 5 с прямоугольной формой импульса подсветки. Как отмечалось выше, это объясняется известным фактом, что при прямоугольной форме им-

пульса подсветки регистрируется максимально возможная величина энергии (при фиксированных значениях амплитуды и длительности  $\Delta t_{лаз}$ ).

Выбранные при расчете параметры для рисунка 4б соответствуют эксперименту [17] с увеличением  $G(t)$  для одного из кадров по экспоненциальному закону. В данном случае  $\Delta t_{лаз} = 10$  нс,  $\Delta t_{фп} = 80$  нс и  $S_{об} = 150$  м, а  $m = 8$ . Расчеты выполнены для фиксированного значения усиления  $G_{макс} = 25500$  (кривые 1 и 2), а так же для экспоненциального его увеличения по закону:  $G(t) = G_0 \exp(t/\Delta t_{фп})$  при  $0 \leq t \leq \Delta t_{фп}$ , где  $G_0 = 10000$  – начальное значение коэффициента усиления (кривые 3, 4 и 5). Как и в предыдущем случае, для кривых 1 и 3 форма импульсов подсветки треугольная с параметрами:  $\beta_{фр} = 0,2$ ;  $\beta_{сп} = 0,8$ , а для кривых 2 и 4:  $\beta_{фр} = 0,8$ ;  $\beta_{сп} = 0,2$ . Для кривой 5 используется прямоугольная форма импульса. Из рисунка 4б видно, что, аналогично предыдущему случаю, форма импульса подсветки не оказывает влияния на параметры центральных частей ПЭП. Исключение составляет случай прямоугольной формы импульса подсветки (кривая 5) по указанной выше причине.

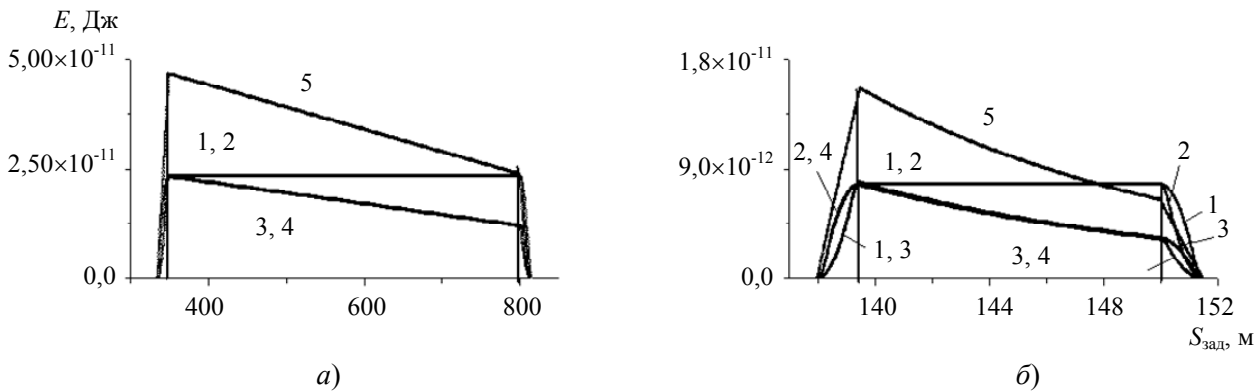


Рис. 4. Зависимости величин регистрируемого сигнала  $E$  от расстояния задержки  $S_{зад}$  при треугольной форме импульсов подсветки с параметрами (1, 3) –  $\beta_{фр} = 0,2$ ;  $\beta_{сп} = 0,8$ ; (2, 4) –  $\beta_{фр} = 0,8$ ;  $\beta_{сп} = 0,2$ ; (5) – форма импульсов подсветки прямоугольная; а) –  $\Delta t_{лаз} = 100$  нс;  $\Delta t_{фп} = 300$  нс;  $S_{об} = 800$  м; б) –  $\Delta t_{лаз} = 10$  нс;  $\Delta t_{фп} = 80$  нс;  $S_{об} = 150$  м

Рассмотрим сейчас более детально области фронтов  $\Delta S_{фр-100\%}$  и спадов  $\Delta S_{сп-100\%}$  на рисунке 4, где проявляется влияние формы импульсов подсветки на ход кривых для ПЭП. Для рисунка 4а для всех кривых длины фронта ПЭП  $\Delta S_{фр-100\%}$  и спада  $\Delta S_{сп-100\%}$  приблизительно равны 15 м. В этом случае отношение

$m = \Delta t_{фп}/\Delta t_{лаз} = 31$  велико и значение  $k = \Delta S_{ЦУ}/\Delta S_{фр-100\%} = 450 \text{ м}/15 \text{ м} = 30$  также достигает сравнимой величины. Аналогично для рисунка 4б:  $m = 8$ ;  $k \approx 7$ . Поэтому с учетом использованных масштабов на рисунке 4б более наглядно, чем на рисунке 4а, видно различие в поведении кривых в области фронта и спада.

Дополнительные расчеты показали, что при выборе для рисунка 4б значения  $m = 20$  ( $\Delta t_{\text{лаз}} = 10$  нс,  $\Delta t_{\text{фп}} = 200$  нс) это различие при новом «масштабе» становится трудно различимым (как и на рисунке 4, а). Сейчас целесообразно пояснить с помощью рисунка 1 (штрихпунктирная кривая), почему именно на интервалах  $\Delta S_{\text{фр-100}}\%$  и  $\Delta S_{\text{сп-100}}\%$  указанное различие проявляется. При передвижении с определенным шагом от рисунка 1б к рисунку 1в (диапазон формирования  $\Delta S_{\text{фр-100}}\%$ ) увеличивается длина регистрируемой части импульса подсветки. Очевидно, что регистрируемая при очередном шаге энергия будет зависеть от формы импульса. Похожее явление наблюдается и для спада ПЭП ( $\Delta S_{\text{сп-100}}\%$ ), которому соответствует переход от рисунка 1е к рисунку 1ж. Только в данном случае регистрируемая длина импульса уменьшается. Величина принимаемого при пошаговом перемещении сигнала также будет зависеть от формы импульса подсветки. Оценки показывают, что вклад в формирование ПЭП процесса  $G(t)$  при линейном или экспоненциальном его увеличении в пределах интервалов  $\Delta S_{\text{фр-100}}\%$  и  $\Delta S_{\text{сп-100}}\%$  (которым соответствует сравнительно малая длительность импульса подсветки при  $\Delta t_{\text{лаз}} \ll \Delta t_{\text{фп}}$ ) пренебрежимо мал по сравнению с вкладом, обусловленным изменением регистрируемой длины лазерного импульса.

В соответствии с выражением (3) при построении 3D-изображения используется отношение сигналов  $E_2$ , описываемых кривыми 3, 4 или 5, к сигналам  $E_1$  для кривых 1 и 2. Из рисунка 4а видно, что для центральных участков ПЭП кривые 3, 4 и 5 линейно зависят от  $S_{\text{зад}}$ , но углы их наклона несколько различаются. На рисунке 4б для аналогичных участков зависимости несколько отличаются от линейной, а углы наклона также имеют небольшое отличие. По этой причине коэффициенты  $\alpha$  и  $\beta$  в выражении (3) будут зависеть от расстояния задержки  $S_{\text{зад}}$ . Из рисунка 4 также следует, что при построении 3D-изображений необходимо исключить участки, соответствующие фронту и спаду ПЭП, где сказывается влияния формы импульсов подсветки на ПЭП. В этих диапазонах также будет достигаться максимальная ошибка в определении расстояний с помощью выражения (3),

поскольку сравнительно небольшие изменения  $S_{\text{зад}}$  приводят к значительным изменениям величины регистрируемого сигнала. Оптимальными являются линейные центральные участки ПЭП, когда угол наклона зависимостей близок к  $45^\circ$ . На практике возможность увеличения значения  $m$  можно использовать для расширения и оптимизации границ применимости выражения (3).

## Эксперимент

Для проверки некоторых сформулированных выше положений выполнены экспериментальные измерения с помощью АИТИС, содержащей встроенное устройство захвата видеосигнала (фрейм-граббер). Подсветка зоны наблюдения осуществлялась матрицей полупроводниковых лазеров типа Л-13, работающих в импульсно-периодическом режиме с максимальной частотой повторения до 4 кГц и длиной волны излучения  $\approx 840$  нм. Форма импульсов близка к так называемой асимметричной выпуклой кривой. Фронт импульса простирается от нулевого значения до  $\approx 0,8\Delta t_{\text{лаз}}$ . Затем начинается спад, где интенсивность излучения уменьшается до нуля практически по линейному закону. В качестве быстродействующего затвора и усилителя яркости изображения использовался ЭОП 3-го поколения. Анализ дополнительных исследований показал, что форма строб-импульса близка к прямоугольной. В соответствии с таблицей 2 это соответствует фиксированному значению коэффициента усиления, когда также справедливы выражения таблицы 1. Объектом наблюдения служила вертикальная стена, расположенная перпендикулярно оптической оси системы. Наблюдение осуществлялось путем дискретного увеличения расстояния задержки с шагом 0,75 м. Расстояние задержки  $S_{\text{зад-}i}$  для  $n_i$ -го кадра равно:  $S_{\text{зад-}i} = S_{\text{зад-}0} + 0,75n_i$ , где  $S_{\text{зад-}0}$  – некоторое начальное значение, которое задавалось на пульте управления. Экспериментальные результаты приведены на рисунке 5 для  $\Delta t_{\text{лаз}} = 40$  нс,  $S_{\text{об}} = 61$  м и  $S_{\text{зад-}0} = 10$  м. Для простоты в дальнейшем будем обращаться к таблице 1. Экспериментальная форма импульса подсветки, как указано выше, несколько отличается от прямоугольной и в условиях эксперимента может проявляться влияние  $E_{\text{шп}}$ . Эти факторы в зависимости от параметров

системы могут приводить к некоторому отличию экспериментальных результатов от соответствующих табличных значений. Отметим, что при нахождении характерных расстояний

$S_{\text{нач}}^{\circ}$ ,  $S_{\text{нач-100\%}}^{\circ}$ ,  $S_{\text{кон-100\%}}^{\circ}$  и  $S_{\text{кон}}^{\circ}$  из рисунка 5 погрешность определения значения  $n_i$  может достигать двух единиц.

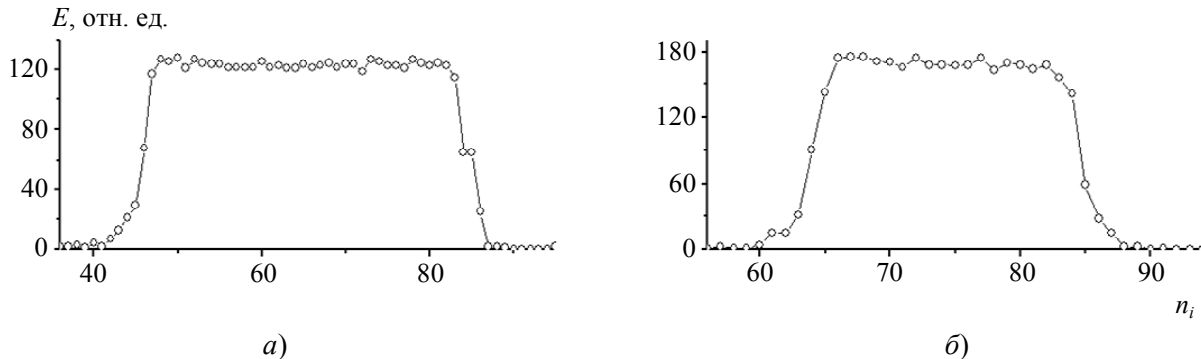


Рис. 5. Зависимости величин регистрируемого сигнала  $E$  от номера шага (кадра)  $n_i$  при  $S_{об} = 61$  м и  $\Delta t_{\text{лаз}} = 40$  нс: а) –  $\Delta t_{\text{фн}} = 160$  нс; б) –  $\Delta t_{\text{фн}} = 80$  нс

Из таблицы 1 следует, что значение  $S_{\text{кон}}^{\text{т}}$  определяется длительностью  $\Delta t_{\text{лаз}}$  и поэтому должно быть одинаковым для обоих рисунков 5. Действительно, в обоих случаях:  $S_{\text{кон}}^{\circ} \approx 10 + 0,75 \times 88 = 76$  м. В тоже время расстояние  $S_{\text{нач}}^{\text{т}}$  зависит от  $\Delta t_{\text{фн}}$  и должно отличаться для обоих рисунков. С учетом сказанного действительно получены разные значения: для рисунка 5а  $S_{\text{нач}}^{\circ} = 41$  м, а для рисунка 5б –  $S_{\text{нач}}^{\circ} = 54$  м. В соответствии с таблицей 1 при  $\Delta t_{\text{лаз}} < \Delta t_{\text{фн}}$  длительности фронта и спада определяются выражением  $\Delta S_{\text{фр}}^{\text{т}} = \Delta S_{\text{сп}}^{\text{т}} = c \Delta t_{\text{лаз}} / 2$  и должны быть одинаковы для обоих рисунков. Из рисунков 5 следует:  $\Delta S_{\text{фр}}^{\circ} \approx \Delta S_{\text{сп}}^{\circ} \approx 0,75 \times 7 = 5,25$  м, где число 7 равно среднему значению разности между двумя числами  $n_i$ , определяющими длительности фронта и спада ПЭП. Это хорошо согласуется с теоретическим значением  $\Delta S_{\text{фр}}^{\text{т}} = \Delta S_{\text{сп}}^{\text{т}} = 6$  м. Из анализа результатов следует, что для начальных точек зоны видимости  $\Delta t_{\text{зад-х}} \approx -30$  нс, а для конечных –  $\Delta t_{\text{зад-х}} \approx -60$  нс. Это отличие, по видимому, обусловлено разным вкладом энергии шумового порога для разных значений  $S_{\text{зад}}$ . Таким образом, имеет место качественное и количественное соответствие экспериментальных и теоретических результатов. Для рисунка 5 достигнуто максимальное значение  $m = 4$ . По техническим причинам для данной

АИТИС реализовать большее значение  $m$  не представляется возможным.

### Заключение

Для первого способа наблюдения предложена модель формирования пространственно-энергетического профиля (ПЭП) зоны видимости для часто реализуемого на практике случая, когда длительность импульсов лазерной подсветки объектов  $\Delta t_{\text{лаз}}$  значительно меньше длительности строб-импульсов (времени экспозиции) фотоприемника  $\Delta t_{\text{фп}}$ , т. е. при  $\Delta t_{\text{лаз}} \ll \Delta t_{\text{фп}}$ . На основе предложенной модели получены аналитические выражения, однозначно связывающие характерные расстояния (точки) ПЭП зоны видимости с длительностями импульсов лазерной подсветки, стробирования и не регулируемой внутренней (технической) задержки, а также моментами времени, соответствующими окончанию фронта и началу спада строб-импульса при его трапецевидной форме. Путем численного моделирования при использовании выражения (1) с помощью специально разработанной программы, учитывающей основанные положения предложенной модели формирования ПЭП зоны видимости (наличие определенных характерных расстояний и учет соответствующих им физических процессов; использование факта, когда при формировании ПЭП учитывается изменение величины коэффициента

усиления фотоприемника при перемещении от конца к его началу), а также экспериментально подтверждена справедливость полученных аналитических выражений. Дана интерпретация экспериментальных результатов для систем с подсветкой в области длин волн 1,57 мкм, которые не могли быть объяснены на основе использовавшихся ранее представлений.

С физической точки зрения целесообразно выделить случаи монотонного (в том числе фиксированного) и не монотонного (трапециевидного) изменения коэффициента усиления фотоприемника  $G(t)$  в течение длительности строб-импульса.

В первом случае структурирование ПЭП зоны видимости обусловлено наличием известных ранее промежуточных характерных расстояний  $S_{\text{нач-100\%}}^T$  и  $S_{\text{кон-100\%}}^T$ , соответствующих начальной и конечной точкам, между которыми регистрируется 100 % энергии импульсов подсветки (центральный участок ПЭП). Длины фронта и спада равны друг другу и определяются при  $\Delta t_{\text{лаз}} < \Delta t_{\text{фп}}$  длительностью импульсов лазерной подсветки ( $\Delta S_{\text{фр-100\%}}^T = \Delta S_{\text{сп-100\%}}^T = c\Delta t_{\text{лаз}} / 2$ ). При монотонном увеличении (уменьшении)  $G(t)$  максимальное значение регистрируемого сигнала достигается в точке  $S_{\text{нач-100\%}}^T$  ( $S_{\text{кон-100\%}}^T$ ). Отношение длины центрального участка  $\Delta S_{\text{ЦУ-100\%}}^T$ , где не проявляется влияние формы импульсов подсветки, к суммарной длине фронта и спада ПЭП, где указанное влияние существенно, приблизительно равно  $\Delta t_{\text{фп}} / (2\Delta t_{\text{лаз}})$ . Таким образом, в данном случае (при  $\Delta t_{\text{лаз}} \ll \Delta t_{\text{фп}}$ ) практически вся длина зоны видимости, за исключением сравнительно коротких диапазонов фронта и спада, может быть использована для построения 3D-изображения области интереса.

При трапециевидном (не монотонном) изменении  $G(t)$  ПЭП зоны видимости также имеет форму трапеции. В этом случае проявляются промежуточные характерные расстояния, соответствующие окончанию фронта  $S_{\text{фр}}^T$  ( $S_{\text{нач-макс}}^T$ ) и началу спада  $S_{\text{сп}}^T$  ( $S_{\text{кон-макс}}^T$ ) ПЭП, однозначно связанные, соответственно, с временами начала спада  $t_{\text{фп-сп}}$  и окончания фронта

$t_{\text{фп-фр}}$  строб-импульса. При этом увеличение (уменьшение) времени  $t_{\text{фп-сп}}$  ведет к уменьшению (увеличению) расстояния  $S_{\text{нач-макс}}^T$ , а при увеличении (уменьшении)  $t_{\text{фп-фр}}$  значение  $S_{\text{кон-макс}}^T$  уменьшается (увеличивается). Таким образом, за формирование фронта ПЭП ответственен спад строб-импульса, а за формирование спада – фронт строб-импульса.

При  $\Delta t_{\text{лаз}} \ll \Delta t_{\text{фп}}$  форма ПЭП с учетом определенных закономерностей отражает (воспроизводит) форму строб-импульса или другими словами: импульс подсветки «прописывает» форму строб-импульса. Поэтому на практике путем выбора формы и временных параметров строб-импульса можно управлять параметрами ПЭП. С другой стороны, исходя из экспериментально зарегистрированного ПЭП, можно определить, например, длительности фронта и спада строб-импульсов при трапециевидной или треугольной их форме.

Полученные результаты могут быть использованы при интерпретации экспериментальных зависимостей, а также для выбора оптимальных параметров АИТИС при решении конкретных практических задач.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гейхман И. Л., Волков В. Г. Основы улучшения видимости в сложных условиях. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 1999.
2. Карасик В. Е., Орлов В. М. Локационные лазерные системы видения. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2013.
3. Волков В. Г., Случак Б. А. / Науч.-техн. журн. «Контент». 2016. Т. 15. № 3. С. 62.
4. Goehler B., Lutzmann P. / Optical Engineering. 2017. Vol. 56. № 3. P. 031203.
5. Laurenzis M., Christnacher F., Monnin D. / Optics Letters. 2007. Vol. 32. № 21. P. 3146.
6. Wang X., Cao Y., Cui W., Liu X., Fan S., Zhou Y., Li Y. / Proc. SPIE. 2014. Vol. 9260. P. 92604L.
7. Kapustin V., Movchan A., Kuryachiy M., Chaldina E. / Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1448. P. 01232.
8. Kapustin V. V., Zahlebin A. S., Movchan A. K., Kuryachiy M. I., Krutikov M. V. / Computer Optics. 2022. Vol. 46. № 6. P. 948.
9. Alant'ev D. V., Golitsyn A. V., Seifi N. A. / Journal of Optical Technolog. 2018. Vol. 85. № 6. P. 355.
10. Голицын А. А., Сейфи Н. А. / Прикладная физика. 2018. № 1. С. 78.
11. Мищенко Н. И., Мовчан А. К., Капустин В. В., Чалдина Е. С., Акулиничев Ю. П., Божсков В. Г. / Доклады ТУСУР. 2020. Т. 23. № 4. С. 16.

12. Kuntsevich B. F., Shabrov D. V. / Proc. SPIE. 2019. Vol. 11159. P. 1115910.
13. Горобец В. А., Кабанов В. В., Кабашиников В. П., Кунцевич Б. Ф., Метельская Н. С., Шабров Д. В. / Журн. прикл. спектр. 2014. Т. 81. № 2. С. 283.
14. Горобец В. А., Кабанов В. В., Кабашиников В. П., Кунцевич Б. Ф., Метельская Н. С., Шабров Д. В. / Журн. прикл. спектр. 2015. Т. 82. № 1. С. 68.
15. Goehler B., Lutzmann P. / Proc. SPIE. 2010. Vol. 7835. P. 783504.
16. Xiuda Z., Huimin Y., Yanbing J. / Optics Letters. 2008. Vol. 33. № 11. P. 1219.
17. Jin C., Sun X., Zhao Y., Zhang Y., Liu L. / Optics Letters. 2009. Vol. 34. № 22. P. 3550.
18. Денисов А. В., Капитонов Д. А., Курников А. С. / Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2019. Т. 19. № 5. С. 783.
19. Huang F., Qiu S., Liu H., Liu Y., Wang P. / Optics Express. 2023. Vol. 31. P. 25527.
20. Кунцевич Б. Ф. / Журн. прикл. спектр. 2022. Т. 89. № 6. С. 869.
21. Кунцевич Б. Ф., Шабров Д. В. / Журн. прикл. спектр. 2022. Т. 89. № 2. С. 260.
22. Steinvall O., Olsson H., Bolander G., Carlsson C., Letalick D. / Proc. SPIE. 1999. Vol. 3707. P. 432.
23. Зайдель И. Н., Куренков Г. И. Электронно-оптические преобразователи. – М.: Изд-во «Советское радио», 1970.
24. Зайцева Е. В. Оценка чувствительности и разрешающей способности телевизионных датчиков на ПЗС-матрицах: Дисс. ... канд. тех. наук. – Томский государственный университет систем управления и радиотехники, 2015.
25. Busck J., Heiselberg H. / Applied Optics. 2004. Vol. 43. № 24. P. 4705.
26. Горобец В. А., Кунцевич Б. Ф., Шабров Д. В. / Журн. прикл. спектр. 2017. Т. 84. № 5. С. 794.

PACS: 42.79.Ls

## Patterns of formation of the visibility zone by active-pulse television systems with a significant difference in the duration of illumination pulses and exposure of the photodetector

*B. F. Kuntsevich, I. N. Puchkovsky, S. S. Shavel and S. B. Bushuk*

SSPA “Optics, Optoelectronics and Laser Technology”  
68-1 Ave. Independence, Minsk, 220072, Belarus  
E-mail: boris\_kuntsevich@mail.ru

*Received 23.01.2025; revised 7.02.2025; accepted 12.02.2025*

*A model of formation of the spatial-energy profile (SEP) of the visibility zone is proposed for the case when the duration of the laser illumination pulses of objects is much shorter than the duration of the strobe pulses (exposure time) of the photodetector. Analytical expressions are obtained that relate characteristic distances (points) of the SEP of the visibility zone with the durations of the laser illumination pulses and the unregulated technical delay, as well as the parameters of the strobe pulses at different time shapes. Numerical calculations and an experiment confirmed the validity of the obtained analytical expressions. An interpretation of the experimental results for systems with illumination in the wavelength range of 1.57  $\mu\text{m}$  is given, which could not be explained on the basis of previously used concepts. Based on the proposed model, the influence of the shape of the illumination pulses on the signal values in the front and tail regions of the SEP is explained by the fact that the recorded part of the pulse duration either increases (from 0 to 100 %) or decreases (from 100 % to 0).*

*Keywords:* active-pulse television measuring system; visibility zone; spatial-energy profile; backlight pulse shape; photodetector strobe pulse shape.



## REFERENCES

1. Geikhman I. L. and Volkov V. G., Principles for improving visibility under complicated conditions. Moscow, OOO Nedra-Biznestsenter, 1999 [in Russian].
2. Karasik V. E. and Orlov V. M., Locating laser vision systems. Moscow, Publishing house of MSTU im. N. E. Bauman, 2001 [in Russian].
3. Volkov V. G. and Sluchak B. A., Scientific and technical journal "Content" **15** (3), 62 (2016) [in Russian].
4. Goehler B. and Lutzmann P., Opt. Eng. **56** (3), 031203 (2017).
5. Laurenzis M., Christnacher F. and Monnin D., Optics Letters **32** (21), 3146 (2007).
6. Wang X., Cao Y., Cui W., Liu X., Fan S., Zhou Y. and Li Y., Proceeding of SPIE **9260**, 92604L (2014).
7. Kapustin V., Movchan A., Kuryachiy M. and Chaldina E., Journal of Physics: Conference Series **1448**, 01232 (2020).
8. Kapustin V. V., Zahlebin A. S., Movchan A. K., Kuryachiy M. I. and Krutikov M. V., Computer Optics **46** (6), 948 (2022).
9. Alant'ev D. V., Golitsyn A. V. and Seifi N. A., Journal of Optical Technology **85** (6), 355 (2018).
10. Golitsyn A. A. and Seifi N. A., Applied Physics, № 1, 78 (2018) [in Russian].
11. Mishchenko N. I., Movchan A. K., Kapustin V. V., Chaldina E. S., Akulinichev Yu. P. and Bozhkov V. G., Proceedings of TUSUR University **23** (4), 16 (2020) [in Russian].
12. Kuntsevich B. F. and Shabrov D. V., Proc. of SPIE **111592019**, 1115910 (2019).
13. Gorobets V. A., Kabanov V. V., Kabashnikov V. P., Kuntsevich B. F., Metelskaya N. S. and Shabrov D. V., J. Appl. Spectr. **81** (2), 279 (2014).
14. Gorobets V. A., Kabanov V. V., Kabashnikov V. P., Kuntsevich B. F., Metelskaya N. S. and Shabrov D. V., J. Appl. Spectr. **82** (1), 63 (2015).
15. Goehler B. and Lutzmann P., Proc. SPIE **7835**, 783504 (2010).
16. Xiuda Z., Huimin Y. and Yanbing J., Optics Letters **33** (11), 1219 (2008).
17. Jin C., Sun X., Zhao Y., Zhang Y. and Liu L., Optics Letters **34**, 3550 (2009).
18. Denisov A. V., Kapitonov D. A. and Kurnikov A. S., Scientific and technical journal of information technologies, mechanics and optics **19** (5) 783 (2019) [in Russian].
19. Huang F., Qiu S., Liu H., Liu Y. and Wang P., Optics Express **31**, 25527 (2023).
20. Kuntsevich B. F., J. Appl. Spectr. **89** (6), 1123 (2022).
21. Kuntsevich B. F. and Shabrov D. V., J. Appl. Spectr. **89** (2), 260 (2022).
22. Steinvall O., Olsson H., Bolander G., Carlsson C. and Letalick D., Proceeding of SPIE **3707**, 432 (1999).
23. Zaidel I. N. and Kurenkov G. I., Electron-optical converters. Moscow, Publishing house "Soviet Radio", 1970 [in Russian].
24. Zaitseva E. V. Evaluation of sensitivity and resolution of television sensors on CCD matrices: Dis. ... candidate of technical sciences. Tomsk State University of Control Systems and Radio Engineering, 2015 [in Russian].
25. Busck J. and Heiselberg H. Applied Optics **43** (24), 4705 (2004).
26. Gorobets V. A., Kuntsevich B. F. and Shabrov D. V., J. Appl. Spectr. **84** (5) 794 (2017).