

УДК 621.384.3:621.391
EDN: GKLWYK

PACS: 42.79.Ls

**Обеспечение навигации транспорта в сложных метеоусловиях
с помощью активно-импульсных телевизионных
измерительных видеосистем**

Б. Ф. Кунцевич

Путем численного моделирования исследованы возможности реализации квазиравномерной подсветки рабочей дистанции при использовании активно-импульсных телевизионных измерительных видеосистем на транспорте. Условно выделяются режимы движения с ближним (рабочая дистанция до 50 м) и дальним (50–150 м) светом. Рабочие дистанции разбиваются на определенное число зон видимости. Предполагается, что в режиме автосканирования за время формирования видеокадра последовательно регистрируются сигналы от всех зон. Сначала вычисляются пространственно-энергетические профили регистрируемого сигнала для каждой из зон. Затем на основе построения суммарного пространственно-энергетического профиля всей рабочей дистанции продемонстрированы возможные варианты выделения подходящего числа зон видимости и распределения мощности подсветки по зонам для режимов движения с ближним и дальним светом для разных значений метеорологической дальности видимости.

Ключевые слова: активно-импульсная телевизионная измерительная видеосистема, зона видимости, пространственно-энергетический профиль, транспорт, режим движения с ближним и дальним светом.

DOI: 10.51368/2307-4469-2024-12-4-379-388

Введение

Активно-импульсные телевизионные измерительные видеосистемы (АИТИС) широко используются для решения различных научных и практических задач [1–5]. Кратко их принцип работы можно сформулировать следующим образом. Наблюдаемая область пространства освещается периодически повторяющимися лазерными импульсами, длитель-

ность 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 обычно используется электронно-оптический преобразователь (ЭОП), который синхронно включается с лазерными импульсами на время $\Delta t_{\text{фп}}$ (строб-импульс фотоприемника), сравнимое с $\Delta t_{\text{лаз}}$. Регулировка времени задержки $\Delta t_{\text{зад}}$ между началами импульсов подсветки и стробирования изменяет расстояние до зоны наблюдения. АИТИС позволяют наблюдать объекты в сравнительно узком слое пространства, называемом зоной видимости (ЗВ). Первоначально АИТИС предназначались для наблюдения в условиях пониженной прозрачности атмосферы (дымка, туман, дождь и т. п.), поскольку вследствие стробирования они позволяют «отсекать» сиг-

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

E-mail: boris_kuntsevich@mail.ru

ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника».
Республика Беларусь, 220072, г. Минск, пр. Независимости, 68-1.

Статья поступила в редакцию 29.07.2024

Принята к публикации 27.08.2024

Шифр научной специальности: 1.3.5

© Кунцевич Б. Ф., 2024

нал помехи обратного рассеяния от близко расположенного слоя дымки, тумана и др. К настоящему времени область применения таких систем значительно расширилась. В частности, АИТИС используются для высокоточного определения расстояний до объектов и построения так называемых трехмерных (3D) изображений [3–5]. Для удешевления и уменьшения массогабаритных параметров в [6] предложено в приемном блоке вместо ЭОП использовать фотоприемник на основе приборов с зарядовой связью со строчным переносом и специальным режимом управления.

Одной из перспективных областей практического применения АИТИС является использование их, например, в качестве локаторов оптических систем [7], а также в виде приборов для ночного безопасного управления транспортом при наличии метеопомех (туман, дымка, дождь и т. д.) [8]. В [7] для повышения эффективности лазерного локатора предложено в АИТИС реализовать режим автоматического сканирования дистанции по дальности (автосканирования) в задаваемых оператором границах. В этом случае дистанция наблюдения «разбивается» на некоторое число зон видимости (например, 5 ЗВ). За время одного кадра ($1/25$ с) путем дискретного увеличения времени задержки $\Delta t_{\text{зад}}$ с некоторым шагом на фотоприемнике (например, ПЗС видеокамере) можно зарегистрировать «суммарное» изображение всей наблюдаемой дистанции, соответствующее 5 зонам видимости. Для получения квазиравномерной яркости изображения предлагается перераспределять среднюю энергию лазерной подсветки (например, в данном случае реализуется 208 импульсов подсветки в течение кадра) с малых расстояний (где она избыточна) на большие (где ее не хватает). Авторы [8] предлагают по сути аналогичный алгоритм для управления работой АИТИС, который они называют дистанционно профилированным подсветом (ДПП) наблюдаемого пространства. В работе [9] также исследуется аналогичный метод коррекции неравномерной яркости изображения в АИТИС с автосканированием по дистанции, основанный на решении системы алгебраических уравнений и учитывающий ослабление света в тумане. Одним из главных недостатков перечисленных выше подходов является следующее. Выводы о возможности

реализации профиля подсветки, соответствующего получению квазиравномерной яркости изображения со всей рабочей дистанции, носят, скорее всего, предположительный концептуальный характер, поскольку не приводится результирующий (просуммированный по всем ЗВ) вид пространственно-энергетического профиля (ПЭП) для всей рабочей дистанции, являющийся суммой ПЭП отдельных зон видимости. Под ПЭП обычно понимают зависимость величины регистрируемого сигнала от расстояния в пределах зоны видимости. В то же время недавно было показано [10–12], что при сравнительно малых дистанциях (условно при расстояниях меньших одного–двух десятков метров) ПЭП приобретает форму асимметричной выпуклой кривой с максимумом, смещенным к началу зоны видимости. При этом длина ПЭП на уровне, например, $1/4$ от максимального значения, становится значительно меньше длины зоны видимости $\Delta S_{\text{ЗВ}}$. Данный фактор должен оказывать существенное влияние на закономерности формирования суммарного квазиравномерного ПЭП в области малых дистанций. В указанных публикациях также не обращается внимание на влияние формы импульсов подсветки на основные параметры ПЭП, которая наиболее часто изменяется в условиях эксперимента [13, 14]. При учете указанных факторов должны варьироваться, например, число импульсов подсветки для каждой из ЗВ и степень их пространственного перекрытия для получения квазиравномерного суммарного ПЭП.

Данная работа посвящена исследованию условий получения квазиравномерной подсветки зоны наблюдения для одной из типичных экспериментальных реализаций формы импульсов подсветки на основе построения суммарного (результатирующего) ПЭП для всей рабочей дистанции путем подбора возможных вариантов выделения подходящего числа зон видимости и распределения мощности подсветки по зонам для режимов движения транспорта с ближним и дальним светом.

Исходные уравнения и предположения

Условно можно выделить два способа (метода) наблюдения (СН) объектов с помощью АИТИС [14]). Первый СН реализуется при

наблюдении неподвижных относительно АИСВ объектов (например, стены здания). При этом обнаружение и распознавание объектов осуществляется путем изменения расстояния задержки $S_{\text{зад}} = c\Delta t_{\text{зад}}/2$. При втором СН (в частности, применение АИТИС на транспорте) задается определенное значение расстояния задержки $S_{\text{зад}}$. В этом случае можно наблюдать совокупность объектов, находящихся в ЗВ на разных расстояниях, или рассматривать перемещение объекта в осевом направлении. В [15] для второго СН для прямоугольной формы импульсов подсветки и стробирования получены аналитические выражения для характерных расстояний (точек) 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

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 $\Delta t_{\text{лаз}} < \Delta t_{\text{фп}}$) (аналитические выражения приведены в таблице; конкретное расположение характерных расстояний поясняется при обсуждении рис. 1). В качестве «реперной» величины в полученных выражениях фигурирует расстояние задержки $S_{\text{зад}}$. Значения характерных расстояний зависят также от длительностей $\Delta t_{\text{лаз}}$ и $\Delta t_{\text{фп}}$. Путем изменения $S_{\text{зад}}$ можно реализовать так называемый метод послыного просмотра пространства. Применительно к транспорту при автосканировании по дальности за время формирования кадра осуществляется послыный просмотр пространства в соответствии с числом выделенных зон видимости.

Таблица

Формулы для расчета характерных расстояний [15]

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

Для второго способа наблюдения, включающего в том числе использование АИТИС на транспортных средствах, выражение для регистрируемого сигнала можно записать в виде [16]:

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

где S – расстояние; E_0 – величина, не зависящая от S ; α – показатель ослабления лазерного излучения в атмосфере; t – время; L и G – функции, описывающие временные зависимости интенсивности излучения лазерной подсветки и чувствительности приемного блока (коэффициента усиления яркости ЭОП).

Как указывалось выше, зависимость $E(S)$ часто называется пространственно-энергетическим профилем (ПЭП) зоны видимости.

Для удобства дальнейшего рассмотрения целесообразно в (1) выделить пространствен-

ный множитель, который в явном виде учитывает расстояние:

$$E_{\text{пр}} = S^{-2} \exp(-2\alpha S) \quad (2)$$

и множитель-свертку, обусловленный физическим принципом работы АИСВ:

$$E_{\text{св}} = \int L(t - 2S/c) G(t - \Delta t_{\text{зад}}) dt. \quad (3)$$

В АИТИС существует так называемый шумовой порог [1]. Это означает, что даже в отсутствие полезного входного сигнала в приемном канале присутствует сигнал, соответствующий некоторому значению энергии так называемого шумового порога $E_{\text{шп}}$. Поэтому полученные при расчетах значения E , меньшие $E_{\text{шп}}$, заменяются на $E_{\text{шп}}$.

Для дальнейшего рассмотрения целесообразно условно выделить режимы движения

транспорта с ближним светом (ДБС; рабочая дистанция до 50 м) и дальним (ДДС; рабочая дистанция 50–150 м).

Результаты расчетов и их обсуждение

При расчетах предполагалось, что подсветка осуществляется лазерным излучением с длиной волны 840 нм. Форма импульса лазерной подсветки $f_{\text{лаз}}(t/\Delta t_{\text{лаз}})$ задавалась близкой к одной из типичных экспериментальных реализаций [14]. Приблизительно она имеет вид «асимметричного колокола» с максимумом при $t/\Delta t_{\text{лаз}} = 0,7$ ($0 \leq t \leq \Delta t_{\text{лаз}}$). При расчетах варьировались амплитуда (максимальное значение) мощности импульсов подсветки $P_{\text{лаз}}$ и длительность $\Delta t_{\text{лаз}}$ с учетом сохранения формы импульса подсветки $f_{\text{лаз}}(t/\Delta t_{\text{лаз}}) = \text{const}$. Для простоты рассматривается случай, соответствующий большинству экспериментальных реализаций прямоугольной формы импульсов стробирования (экспозиции) фотоприемника, и предполагается, что коэффициент усиления яркости ЭОП равен: $G_m = 40000$ [1]. Значения остальных параметров: метеорологическая дальность видимости $S_{\text{МДВ}} = 20$ км (если не оговорено другое); энергия шумового порога $E_{\text{шп}} = 1 \times 10^{-12}$ Дж [16].

Рассмотрение целесообразно начать с пояснения особенностей формирования ПЭП при малых расстояниях, о чем упоминалось во введении. На рисунке 1 приведены ПЭП для трех расстояний задержки $S_{\text{зад}}$. Для сравнения наряду с регистрируемым сигналом E (кривые 1) представлены также зависимости для множителя-свертки $E_{\text{св}}$ (кривые 2). При расчетах значение $\Delta t_{\text{лаз}} = 8$ нс ограничено с максимальной стороны по следующей причине. Известно [1], что для полноценной работы АИТИС длительность импульса подсветки должна быть значительно меньше времени распространения света до объекта и обратно $t_{2\text{об}}$. Предполагается, что при ДБС самый близкий предмет находится на расстоянии ~ 5 м. Для определенности выбирая $\Delta t_{\text{лаз}} = t_{2\text{об}}/4$, получаем $\Delta t_{\text{лаз}} \approx 8$ нс. На длительность $\Delta t_{\text{фп}}$ никаких ограничений не накладывается. Для увеличения длины ЗВ (см. таблицу) выбрано $\Delta t_{\text{фп}} = 150$ нс. Форму ПЭП на рисунке 1а–б будем называть квазитрапецией, а на рисун-

ке 1в – квазитреугольником или асимметричной выпуклой кривой. Регистрируемый сигнал на рисунке 1а–б имеет типичную для второго СН форму. Поясним с помощью рисунка 1б расположение введенных ранее характерных точек. Расстояния $S_{\text{нач}} = 12,8$ м и $S_{\text{кон}} = 36,5$ м соответствуют начальной и конечной точкам ЗВ. Соответственно, $S_{\text{нач-100\%}} = 14$ м и $S_{\text{кон-100\%}} = 35,4$ м. Рассмотрим рисунок 1а. Максимум сигнала, как и обычно, достигается в точке $S_{\text{нач-100\%}} \approx 40$ м. Действительно, из таблицы для прямоугольной формы импульсов следует: $S_{\text{нач-100\%}}^{\text{T}} = S_{\text{зад}} = 40$ м. Вычисленное и теоретическое значения практически совпадают. В данном случае, например, $S_{\text{нач}}^{\text{T}} = S_{\text{зад}} - c\Delta t_{\text{лаз}}/2 = 38,8$ м, а вычисленное значение $S_{\text{нач}} = 38,85$ м несколько больше из-за учета $E_{\text{шп}}$. По мере уменьшения $S_{\text{зад}}$ (рис. 1б) различие между «ходом» кривых 1 и 2 увеличивается при движении от точки $S_{\text{нач-100\%}}$ к точке $S_{\text{кон}}$. Максимальное различие между кривыми наблюдается при сравнительно малом значении $S_{\text{зад}}$ (рис. 1в). В этом случае расстояние $S_{\text{макс}}$, соответствующее максимуму регистрируемого сигнала, становится даже несколько меньшим $S_{\text{нач-100\%}}^{\text{T}}$, которое имеет смысл только для кривой 2. Дополнительный анализ показывает, что такое увеличение различия в поведении кривых 1 и 2 и превращение в конечном итоге ПЭП (т. е. зависимости $E(S)$) в асимметричную выпуклую кривую с максимумом, расположенным между точками $S_{\text{нач}}$ и $S_{\text{нач-100\%}}$ (последнее применимо только для кривой 2), обусловлено влиянием пространственного множителя $E_{\text{пр}}$, а точнее сомножителя $1/S^2$ (например, при $S \rightarrow 0$ значение сигнала асимптотически увеличивается: $E \rightarrow \infty$). По этой причине на рисунке 1в характерные расстояния $S_{\text{нач-100\%}}$ и $S_{\text{кон-100\%}}$ справедливы только для кривой 2. На кривой 1 они не проявляются и теряют физический смысл. В то же время характерные расстояния $S_{\text{нач-100\%}}$ и $S_{\text{кон-100\%}}$ для кривой 1 четко проявляются на рисунке 1а и 1б, соответствующих большим значениям $S_{\text{зад}}$. Вычисленная длина ЗВ равна: 23,6 м (рис. 1а), 23,5 м (рис. 1б) и 22,7 м (рис. 1в). Эти значения из-за учета $E_{\text{шп}}$ несколько меньше предельно возможного теоретического: $\Delta S_{\text{ЗВ}}^{\text{T}} = c(\Delta t_{\text{лаз}} + \Delta t_{\text{фп}})/2 = 23,7$ м. Однако с точки зрения получения квазирав-

номерного результирующего ПЭП в пределах всей дистанции для режима ДБС представляет интерес только та часть зоны видимости, где величина сигнала (особенно со стороны $S_{\text{кон}}$) больше некоторого граничного значения $E_{\text{гр}}$. Пусть $E_{\text{гр}} = (1/4)E_{\text{макс}}$, где $E_{\text{макс}}$ – максимальное значение регистрируемого сигнала, достигаемое в пределах ЗВ. Соответствующие этому критерию длины ЗВ, которые назовем рабочими, равны: $\Delta S_{\text{ЗВ-раб}} = \Delta S_{\text{ЗВ}}(1/4) = 22,6$ м (рис. 1а); 14,8 м (рис. 1б) и 2,7 м (рис. 1в). Такое существенное уменьшение $\Delta S_{\text{ЗВ-раб}}$ обусловлено увеличением динамического диапазона изменения множителя $E_{\text{пр}}$ при уменьшении $S_{\text{зад}}$ и носит неустранимый принципиальный характер. Для рисунке 1а в пределах обычной длины ЗВ значение $E_{\text{пр}}$ уменьша-

ется 2,6 раз, для рисунка 1б – в 8 раз, а для рисунка 1в – в 834 раза. С учетом сказанного для рисунка 1в рабочая длина ЗВ заканчивается на расстоянии 3,7 м, т. е. сосредоточена в окрестности точки $S_{\text{нач}}$. Поэтому при сравнительно малых значениях $S_{\text{зад}}$ нельзя достигнуть увеличения $\Delta S_{\text{ЗВ-раб}}$ путем увеличения длительности $\Delta t_{\text{фп}}$. Рассмотренное выше превращение при сравнительно малых расстояниях ПЭП в выпуклую асимметричную кривую с максимумом, смещенным к началу ЗВ, и одновременным уменьшением в несколько раз (в данном случае в 8,4 раза) рабочей длины ЗВ $\Delta S_{\text{ЗВ-раб}}$ по сравнению с обычной $\Delta S_{\text{ЗВ}}$ назовем эффектом малых расстояний (ЭМР). Проявление ЭМР рассматривается ниже применительно к режиму ДБС.

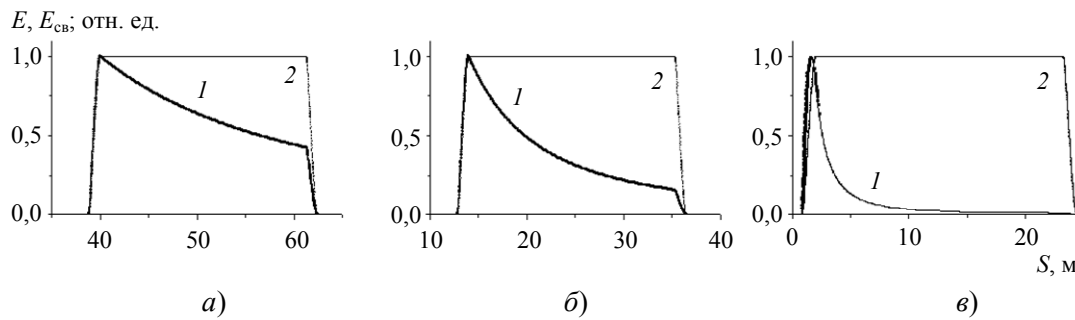


Рис. 1. Зависимости величин регистрируемого сигнала $E(1)$ и множителя-свертки $E_{\text{св}}(2)$ от расстояния S при $\Delta t_{\text{лаз}} = 8$ нс, $\Delta t_{\text{фп}} = 150$ нс: а) – расстояние задержки $S_{\text{зад}} = 40$ м; б) – $S_{\text{зад}} = 14$ м; в) – $S_{\text{зад}} = 2$ м

На рисунке 2 приведен пример расчета возможной реализации квазиравномерного распределения энергии подсветки в режиме ДБС. Расчетным путем установлено, что для получения квазиравномерной подсветки в режиме автосканирования можно использовать 23 зоны видимости. На рисунке 2а цифрами обозначены вычисленные ПЭП для каждой из зон видимости E_n . Для наглядности и упрощения рисунка изображены ПЭП только для трех первых и последних ЗВ. На рисунке 2б приведен результирующий ПЭП, который представляет собой просуммированный по всем ЗВ сигнал $E_{\text{сум}}$ для каждого значения расстояния S . Приведем параметры, которые подбирались при расчетах для каждой из двадцати трех зон видимости: 1(2; 1; $3,9 \times 10^{-10}$), 2(4; 4; $3,1 \times 10^{-10}$), 3(6; 6; $2,2 \times 10^{-10}$), 4(8; 9; $1,8 \times 10^{-10}$), 5(10; 12; $1,5 \times 10^{-10}$), 6(12; 15; $1,3 \times 10^{-10}$), 7(14; 18; $1,2 \times 10^{-10}$), 8(16; 22; $1,1 \times 10^{-10}$), 9(18; 25; $1,0 \times 10^{-10}$), 10(20;

29; $9,2 \times 10^{-11}$), 11(22; 33; $8,8 \times 10^{-11}$), 12(24; 37; $8,3 \times 10^{-11}$), 13(26; 40; $7,7 \times 10^{-11}$), 14(28; 43; $7,1 \times 10^{-11}$), 15(30; 47; $6,7 \times 10^{-11}$), 16(32; 50; $6,2 \times 10^{-11}$), 17(34; 52; $5,8 \times 10^{-11}$), 18(36; 53; $5,2 \times 10^{-11}$), 19(38; 55; $4,9 \times 10^{-11}$), 20(40; 57; $4,6 \times 10^{-11}$), 21(42; 61; $4,5 \times 10^{-11}$), 22(44; 63; $4,2 \times 10^{-11}$), 23(46; 67; $4,1 \times 10^{-11}$). Здесь введены обозначения: число перед круглой скобкой обозначает номер зоны видимости n ; в круглых скобках: первое число – расстояние задержки $S_{\text{зад}}$ (в м); второе число – коэффициент k , на который надо умножить амплитуду мощности подсветки для соответствующей зоны по сравнению с амплитудой мощности для первой зоны (для 1-й ЗВ $k = 1$ для метеорологической дальности видимости $S_{\text{МДВ}} = 20$ км); третье число – подобранное значение $E_{\text{макс}}$ (в Дж) для соответствующей ЗВ. Для простоты при увеличении номера зоны на единицу значение $S_{\text{зад}}$ увеличивается на 2 м. Коэффи-

циенты k подбирались численным путем. Из рисунка 2а видно, что для 1–3 зон видимости ПЭП имеют форму выпуклых асимметричных кривых, а для 21–23 ЗВ – форму квазитрапеции. Для промежуточных ЗВ наблюдаются более сложные формы ПЭП. Из рисунка 2б следует, что на малых дистанциях в области проявления ЭМР глубина модуляции суммарного ПЭП $E_{\text{сум}}$ максимальна. Для уменьшения глубины модуляции в этом диапазоне использованный шаг приращения $S_{\text{зад}}$ в 2 м

можно заменить на 1 м. При увеличении дистанции и переходе к квазитрапециевидной форме для отдельных ПЭП глубина модуляции $E_{\text{сум}}$ с практической точки зрения становится пренебрежимо малой. Таким образом, рисунок 2б свидетельствует о возможности реализации квазиравномерной яркости изображения в режиме ДБС путем регистрации за время одного кадра совокупности зон видимости (автосканирования) с указанными выше подобранными параметрами.

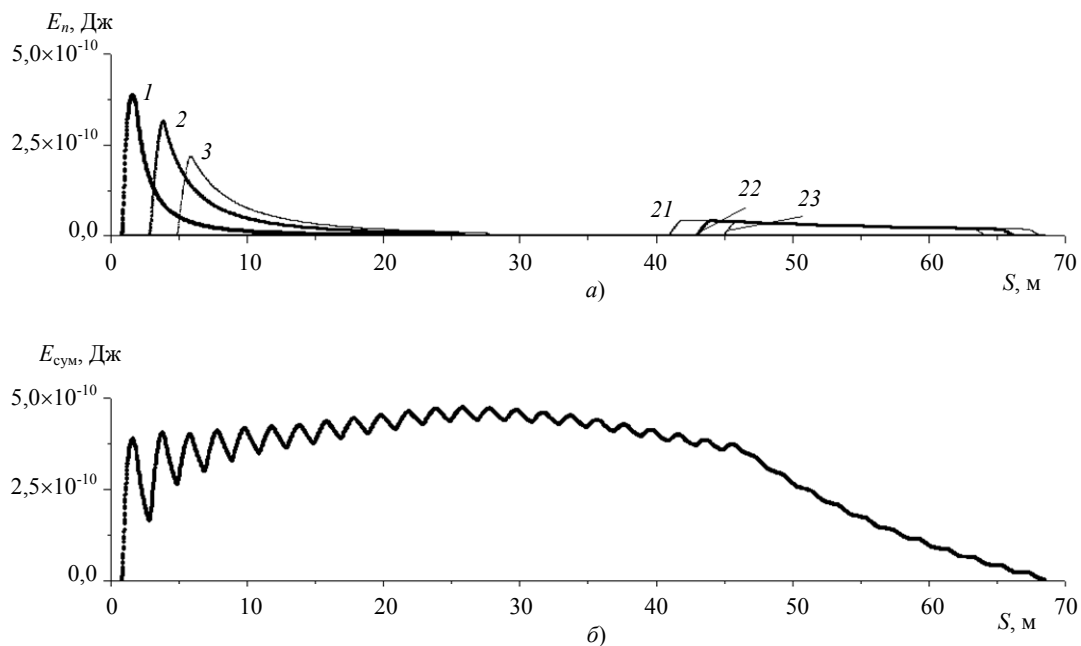


Рис. 2. Зависимости величин регистрируемых сигналов от расстояния S для режима движения с ближним светом при $\Delta t_{\text{лаз}} = 8$ нс и $\Delta t_{\text{фн}} = 150$ нс: а) – регистрируемые сигналы для трех первых и трех последних зон видимости E_n ; б) – результирующий сигнал $E_{\text{сум}}$, просуммированный по всем зонам видимости

В публикациях по данной теме обычно делается акцент на применении АИСВ для управления транспортом в условиях метеопомех (например, [8]). На рисунке 2 приведены результаты расчетов для метеорологической дальности видимости $S_{\text{МДВ}} = 20$ км (ясно; $\alpha = 1 \times 10^{-4} \text{ м}^{-1}$). Для полноты картины были проведены расчеты для $S_{\text{МДВ}} = 0,35$ км (обычный туман; $\alpha = 94 \times 10^{-4} \text{ м}^{-1}$) и $S_{\text{МДВ}} = 0,10$ км (густой туман; $\alpha = 384 \text{ м}^{-1}$) и получены зависимости, аналогичные представленным на рисунке 2. На рисунке 3 приведен обобщающий график для трех указанных значений $S_{\text{МДВ}}$, отражающий зависимость параметра k от номера n ЗВ. Для сведения укажем, что для первой ЗВ вследствие малого значения $S_{\text{зад}} = 2$ м

для трех кривых $k = 1$. Однако максимальные значения k , соответствующие 23-й ЗВ, сравнительно сильно отличаются и равны: 67 (кривая 1), 157 (кривая 2) и 1638 (кривая 3). Очевидно, что в указанном рабочем диапазоне расстояний используется один и тот же множитель $1/S^2$ для трех кривых. Поэтому отличие в разном «ходе» кривых объясняется влиянием множителя $\exp(-2\alpha S)$. Это свидетельствует о важности учета метеорологической обстановки при оценке возможностей использования АИТИС на транспорте. Можно заключить, что реализация условий, соответствующих кривым 1 и 2, вполне реальна. Для реализации сравнительно большого максимального значения $k = 1638$ (кривая 3) очевидно потре-

буются дополнительные технические решения, направленные на обеспечение соответствующей амплитуды мощности подсветки.

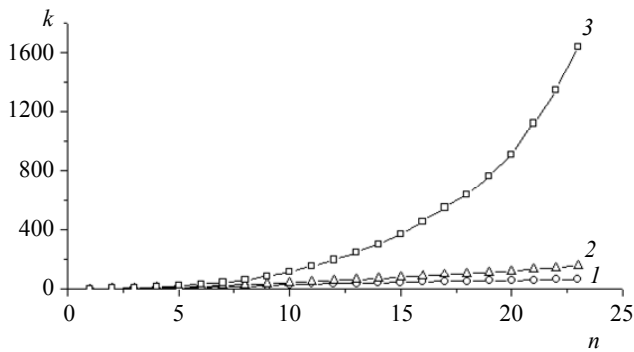


Рис. 3. Зависимости параметра k от номера зоны видимости n в режиме движения с ближним светом при $\Delta t_{\text{лаз}} = 8$ нс и $\Delta t_{\text{фп}} = 150$ нс для метеорологических дальностей видимости: (1) – $S_{\text{МДВ}} = 20$ км; (2) – $S_{\text{МДВ}} = 0,35$ км; (3) – $S_{\text{МДВ}} = 0,1$ км

Рассмотрим сейчас режим ДДС. Пусть расстояние до ближайшего объекта наблюдения равно 40 м. Приняв для определенности $\Delta t_{\text{лаз}} = t_{2\text{об}}/3$, получаем для верхней границы $\Delta t_{\text{лаз}} \approx 90$ нс. Аналогично режиму ДБС пусть $\Delta t_{\text{фп}} = 150$ нс. Результаты расчетов для данного случая приведены на рисунке 4. Использовались следующие параметры для каждой из девяти ЗВ: 1(50; 1; $2,8 \times 10^{-10}$), 2(60; 1,2; $2,6 \times 10^{-10}$), 3(70; 1,4; $2,6 \times 10^{-10}$), 4(80; 1,6; $2,7 \times 10^{-10}$), 5(90; 1,8; $2,8 \times 10^{-10}$), 6(100; 2,0; $2,8 \times 10^{-10}$), 7(110; 2,2; $2,7 \times 10^{-10}$), 8(120; 2,4; $2,6 \times 10^{-10}$), 9(130; 2,6; $2,6 \times 10^{-10}$).

Из рисунка 4а следует, в случае ДДС во всем диапазоне рассматриваемых расстояний ПЭП имеют форму квазитрапеции. Для всех

ЗВ значения $\Delta S_{\text{ЗВ}}$ практически одинаковы и равны ≈ 35 м. Эта величина из-за учета $E_{\text{шп}}$ несколько меньше предельно возможной теоретической $\Delta S_{\text{ЗВ}}^{\text{т}} = 36$ м. С практической точки зрения очень важно, что для всех ЗВ реализуются практически одинаковые значения $\Delta S_{\text{ЗВ-раб}} = \Delta S_{\text{ЗВ}}(1/4) = 27$ м, которые к тому же весьма близки к $\Delta S_{\text{ЗВ}}$. На рисунке 4б приведен вид результирующего (суммарного) ПЭП для всей дистанции, соответствующей режиму ДДС. В данном случае вполне достаточно девяти ЗВ для реализации квазиравномерной подсветки во всем диапазоне расстояний. Из рисунка 4а видно, что максимальные значения сигнала для отдельных ЗВ приблизительно одинаковы и сгруппированы около величины, близкой к $E_n \approx 3 \times 10^{-10}$ Дж. Обратим внимание, что для возможности сопоставления режимов ДБС и ДДС эти значения выбирались близкими к соответствующей величине для первой ЗВ на рисунке 2а ($E_n = 3,9 \times 10^{-10}$ Дж). Приблизительно двукратное увеличение при суммировании значения $E_{\text{сум}}$ обусловлено тем, что форма всех ПЭП имеет вид квазитрапеции с близкими значениями $\Delta S_{\text{ЗВ}}$ и $\Delta S_{\text{ЗВ-раб}}$, а каждая из ЗВ частично в одинаковой мере пространственно перекрывается с соседними. Из рисунка 4а видно, что, например, 5-я ЗВ перекрывается с 3, 4, 6 и 7 зонами видимости. В данном случае для реализации в области плато значения $E_{\text{сум}}$, сравнимого с аналогичным на рисунке 2б, можно использовать значительно меньшие максимальные величины E_n , достигаемые в пределах каждой ЗВ.

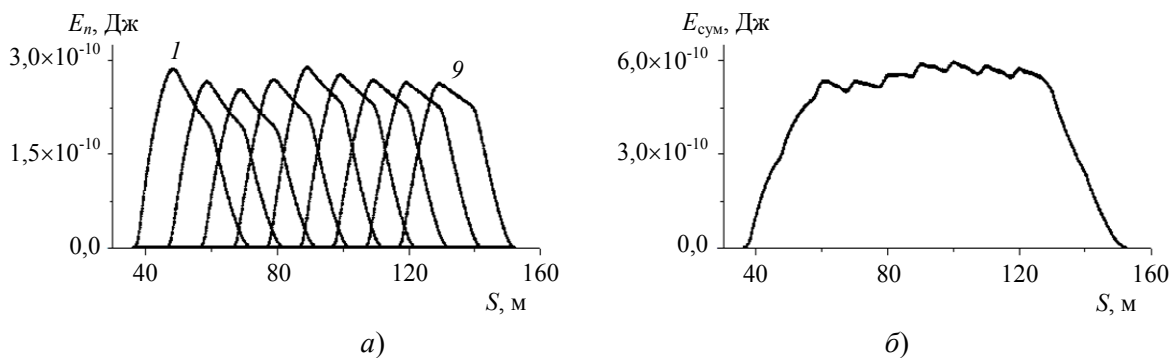


Рис. 4. Зависимости величин сигналов от расстояния S для режима движения с дальним светом при $\Delta t_{\text{лаз}} = 90$ нс и $\Delta t_{\text{фп}} = 150$ нс: а) – сигналы для каждой из зон видимости E_n ; б) – результирующий сигнала $E_{\text{сум}}$, просуммированный по всем зонам видимости

Для полноты картины и с целью выяснения возможностей использования АИТИС на транспорте при различных метеоусловиях на рисунке 5 также приведена зависимость коэффициента k от номера n ЗВ для двух значений МДВ для режима ДДС. Из расчетов следует, что для 1-й ЗВ значения k равны: 4 (кривая 1) и 10 (кривая 2). Обратим внимание, что для возможности сравнения режимов ДБС и ДДС в данном случае при вычислении k для нормировки используется амплитуда мощности подсветки, соответствующая 1-й ЗВ для кривой 1 на рисунке 3. С учетом этого для 9-й ЗВ получено: $k = 76$ (кривая 1) и 325 (кривая 2). Аналогичные расчеты были выполнены и для МДВ = 0,1 км. Однако график для данного случая не приводится, поскольку с увеличением n параметр k сравнительно быстро

нарастает, принимая, например, уже для 5-й ЗВ значение $k = 4725$. Реализация указанного значения на практике представляется проблематичной. Сравнение результатов для рисунка 3 и 5 свидетельствует о том, что увеличение расстояния задержки $S_{\text{зад}}$ (переход от режима ДБС к ДДС) и уменьшение метеорологической дальности видимости ведут к значительному увеличению параметра k , т. е. амплитуды мощности подсветки. Отмеченное возрастание k может служить на практике ограничивающим фактором при использовании АИТИС, поскольку требует значительного увеличения амплитуды $P_{\text{лаз}}$ мощности подсветки. Повышения мощности $P_{\text{лаз}}$ можно достигнуть, например, за счет увеличения частоты следования импульсов лазерной подсветки или числа лазеров подсветки.

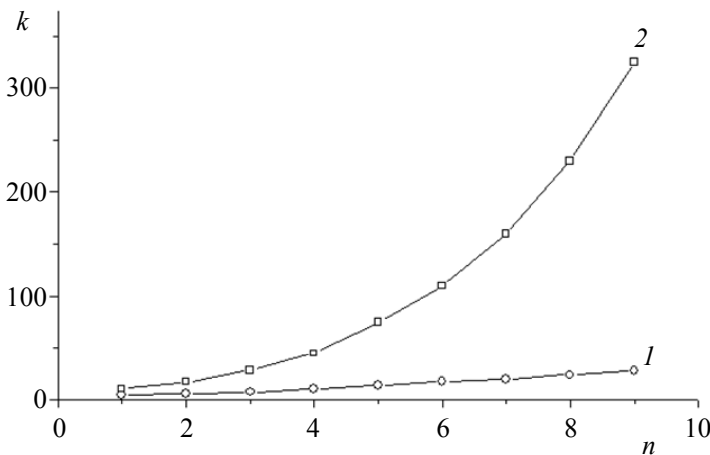


Рис. 5. Зависимости параметра k от номера зоны видимости n в режиме движения с дальним светом при $\Delta t_{\text{лаз}} = 90$ нс и $\Delta t_{\text{фн}} = 150$ нс для метеорологических дальностей видимости: (1) – $S_{\text{МДВ}} = 20$ км; (2) – $S_{\text{МДВ}} = 0,35$ км

Заключение

Численно исследованы возможности использования активно-импульсных телевизионных измерительных видеосистема для ночного управления транспортом, в том числе в условиях метеопомех. Для этого условно выделяются режимы движения транспорта с ближним светом (ДБС; рабочая дистанция до 50 м) и дальним (ДДС; рабочая дистанция 50–150 м). Для выяснения условий реализации квазиравномерной подсветки рабочая дистанция методом подбора разбивается на необходимое число зон видимости, сигналы от которых автоматически последовательно регистрируются за время формирования видеокadra, позволяя в конечном итоге вычислить «суммарный» сигнал для всей рабочей дистанции. На основе

построения суммарного пространственно-энергетического профиля (ПЭП) всей рабочей дистанции продемонстрированы возможные варианты выделения подходящего числа зон видимости и распределения мощности подсветки по зонам для режимов движения с ближним и дальним светом. Показано, что для режима ДБС принципиальным ограничивающим фактором для получения квазиравномерной подсветки на малых дистанциях является превращение ПЭП для отдельных зон видимости в асимметричные выпуклые кривые с максимумами, смещенными к началам зон видимости, и рабочими длинами зон видимости, значительно меньшими общепринятых длин зон видимости. Вследствие указанного ограничивающего фактора требуется существенное увеличение числа зон видимости. В режиме

ДДС реализация квазиравномерной подсветки возможна при использовании меньшего числа зон видимости из-за отсутствия указанного эффекта. Показано, что при уменьшении метеорологической дальности видимости требуется значительное увеличение средней мощности подсветки для поддержания квазиравномерной яркости изображения в пределах всей рабочей дистанции. Это может служить ограничивающим фактором на практике, прежде всего в режиме ДДС.

Основные положения выше описанного подхода приведены впервые и могут использоваться в дальнейшем для более детального исследования потенциальных возможностей практического применения АИТИС на транспорте в разных условиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Карасик В. Е., Орлов В. М. Локационные лазерные системы видения: учеб. пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001.
2. Волков В. Г., Случак Б. А. / Науч.-техн. журн. «Контент». 2016. Т. 15. № 3. С. 62.
3. Goehler B., Lutzmann P. / Optical Engineering. 2017. Vol. 56. № 3. P. 031203.
4. Laurenzis M., Bacher E. / Appl. Optics. 2011. Vol. 50. № 21. P. 3824.
5. Wang X., Cao Y., Cui W., Liu X., Fan S., Zhou Y., Li Y. / Proc. SPIE. 2014. Vol. 9260. P. 92604L.
6. Голицын А. А., Сейфи Н. А. / Прикладная физика. 2018. № 1. P. 78.
7. Голицын А. В. / Изв. вузов. Приборостроение. 2009. Т. 52. № 6. С. 18.
8. Случак Б. А., Умнов В. О. / XXXIII Международная конференция «Лазеры в науке, технике, медицине»: сб. научных трудов. Т. 33 / под ред. Петрова В. А. – М., 2023. С. 91–96.
9. Кабашиников В. П., Кунцевич Б. Ф. / I Межд. науч.-техн. конф. «Опто-, микро- и СВЧ-электроника-2018» (22–26 октября 2018 года, г. Минск, Беларусь). сб. научных статей. – Минск, 2018. С. 256–259.
10. Капустин В. В., Мовчан А. К., Зайцева Е. В., Курячий М. И. / Транспортные системы и технологии. 2018. Т. 4. № 1. С. 68.
11. Кабашиников В. П., Кунцевич Б. Ф. / Журн. прикл. спект. 2021. Т. 88. № 1. С. 137.
12. Кунцевич Б. Ф., Кабашиников В. П., Шабров Д. В. / Журн. прикл. спект. 2021. Т. 88. № 5. С. 782.
13. Горобец В. А., Кунцевич Б. Ф., Шабров Д. В. / Журн. прикл. спект. 2017. Т. 84. № 5. С. 794.
14. Kuntsevich B. F., Shabrov D. V. / Proc. SPIE. 2019. Vol. 11159. P. 1115910.
15. Горобец В. А., Кабанов В. В., Кабашиников В. П., Кунцевич Б. Ф., Метельская Н. С., Шабров Д. В. / Журн. прикл. спект. 2015. Т. 82. № 1. С. 68.
16. Кунцевич Б. Ф., Шабров Д. В. / Журн. прикл. спект. 2022. Т. 89. № 2. С. 260.

PACS: 42.79.Ls

Ensuring vehicle navigation in difficult weather conditions using active-pulse television measuring videosystems

B. F. Kuntsevich

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

Received 29.07.2024; accepted 27.08.2024

Using numerical modeling, the possibilities of implementing quasi-uniform illumination of the working distance when using active-pulse television video measuring systems in transport were investigated. Conventionally, driving modes with low beam (working distance up to 50 m) and high beam (50–150 m) are distinguished. Working distances are divided into a certain number of visibility zones. It is assumed that in the autoscan mode, signals from all zones are sequentially recorded during the formation of a video frame. First, the spatial-energy profiles of the recorded signal are calculated for each of the zones. Then, based on the construction of a summary spatial-energy profile of the entire working distance, possible

options for identifying a suitable number of visibility zones and distributing backlight power across zones for driving modes with low and high beams for different values of meteorological visibility range are demonstrated.

Keywords: active-pulse television measuring video system, visibility zone, spatial-energy profile, transport, driving mode with low and high beams.

REFERENCES

1. Karasik V. E. and Orlov V. M., Locating laser vision systems: A tutorial. – M.: Publishing house of MSTU im. N. E. Bauman, (2001) [in Russian].
2. Volkov V. G. and Sluchak B. A., Scientific and technical journal "Content" **15** (3), 62 (2016) [in Russian].
3. Goehler B. and Lutzmann P., Opt. Eng. **56** (3), 031203 (2017).
4. Laurenzis M. and Bacher E., Appl. Opt. **50** (21), 3824 (2011).
5. Wang X., Cao Y., Cui W., Liu X., Fan S., Zhou Y., Li Y., Proc. SPIE **9260**, 92604L (2014).
6. Golitsyn A. A., Seifi N. A. Applied Physics, № 1, 78 (2018) [in Russian].
7. Golitsyn A. V., Izv. Universities Instrument Engineering **52** (6), 18 (2009) [in Russian].
8. Sluchak B. A. and Umnov V. O. XXXIII International Conference "Lasers in Science, Technology, Medicine". Collection of scientific papers. Vol. 33. Ed. Petrov V. A., Moscow, 2023, pp. 91–96 [in Russian].
9. Kabashnikov V. P. and Kuntsevich B. F. I International Scientific and Technical Conference "Opto-, micro- and microwave electronics-2018" (October 22–26, 2018, Minsk, Belarus). Collection of scientific articles, Minsk, 2018, pp. 256–259 [in Russian].
10. Kapustin V. V., Movchan A. K., Zaytseva E. V. and Kuryachiy M. I., Transport systems and technologies, **4** (1), 68 (2018) [in Russian].
11. Kabashnikov V. P. and Kuntsevich B. F., J. Appl. Spectr. **88** (1), 137 (2021).
12. Kuntsevich B. F., Kabashnikov V. P. and Shabrov D. V., J. Appl. Spectr. **88** (5), 782 (2021).
13. Gorobets V. A., Kuntsevich B. F. and Shabrov D. V., J. Appl. Spectr. **84** (5), 794 (2017).
14. Kuntsevich B. F. and Shabrov D. V., Proceeding of SPIE **11159**, 1115910 (2019).
15. Gorobets V. A., Kabanov V. V., Kabashnikov V. P., Kuntsevich B. F., Metelskaya N. S. and Shabrov D. V., J. Appl. Spectr. **82** (1), 68 (2015).
16. Kuntsevich B. F. and Shabrov D. V., J. Appl. Spectr. **89** (2), 260 (2022).