

Особенности формирования зоны видимости активно-импульсными системами наблюдения при учете размеров объекта

Б. Ф. Кунцевич

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

Учтено изменение соотношения между площадями поперечного сечения луча подсветки в плоскости объекта и наблюдаемого объекта на формирование пространственно-энергетического профиля зоны видимости активно-импульсных систем наблюдения. На практике это в основном проявляется в уменьшении амплитуды регистрируемого сигнала и длины зоны видимости.

Ключевые слова: активно-импульсная система видения; учет размера объекта наблюдения.

Features of the formation of the visibility zone by active-pulse surveillance systems when taking into account the size of the object

B. F. Kuntsevich

State Scientific and Production Association "Optics, Optoelectronics and Laser Technology",
Minsk, Belarus, e-mail: bkun@ifanbel.bas-net.by

The change in the ratio between the cross-sectional areas of the illumination beam in the plane of the object and the observed object is taken into account in the formation of the spatial-energy profile of the visibility zone of active-pulse observation systems. In practice, this mainly manifests itself in a decrease in the amplitude of the recorded signal and the length of the visibility zone.

Keywords: active-pulse vision system; auto scanning mode of visibility area.

Введение

К настоящему времени много публикаций посвящено исследованию и разработке активно-импульсных систем видения (АИСВ) для решения различных научных и практических задач (например, [1–6]). Принцип работы АИСВ можно сформулировать следующим образом. Область интереса освещается периодически следующими лазерными импульсами, длительность которых $\Delta t_{\text{лаз}}$ значительно меньше времени распространения света до зоны наблюдения и обратно. В приемном блоке в качестве быстродействующего затвора и усилителя отраженного светового излучения чаще всего используется электронно-оптический преобразователь (ЭОП), который синхронно включается с лазерными импульсами на время $\Delta t_{\text{фп}}$ (строб-импульс), сравнимое с $\Delta t_{\text{лаз}}$. Путем изменения времени задержки $\Delta t_{\text{зад}}$ между началами импульсов подсветки и стробирования можно варьировать расстояние до зоны наблюдения. АИСВ позволяют наблюдать объекты в сравнительно узком слое пространства, называемом зоной видимости (ЗВ). Ранее считалось, что длина ЗВ равна: $\Delta S_{\text{ЗВ}}^T = c(\Delta t_{\text{лаз}} + \Delta t_{\text{фп}})/2$. Первоначально АИСВ предназначались для наблюдения в условиях пониженной прозрачности атмосферы (дымка, туман, дождь и т.п.), поскольку вследствие стробирования они позволяют «отсекать» сильный сигнал помехи обратного рассеяния от близко распо-

женного слоя дымки, тумана и др. К настоящему времени область применения таких систем значительно расширилась. В частности, АИСВ используются для определения расстояний до объектов и построения так называемых трехмерных (3D) изображений [4–6].

Известно [2], что величина регистрируемого АИСВ сигнала E пропорциональна $1/S^2$ (если площадь поперечного сечения луча подсветки в плоскости объекта $A_{\text{лаз}}$ меньше площади поперечного сечения наблюдаемого объекта $A_{\text{об}}$), либо $E \sim 1/S^4$ (если реализуется противоположное соотношение между указанными площадями). В известных публикациях обычно рассматривается случай, когда $E \sim 1/S^2$.

Настоящая работа посвящена исследованию особенностей формирования пространственно-энергетического профиля зоны видимости АИСВ при условии, что в пределах ЗВ или в ее окрестности соотношение между $A_{\text{лаз}}$ и $A_{\text{об}}$ изменяется на противоположное.

1. Используемые уравнения и приближения

Выражение для величины регистрируемого сигнала E запишем в виде (например, [7]):

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

где S – расстояние до объекта, который находится в пределах ЗВ; E_0 – константа, не зависящая от S ; α – показатель ослабления лазерного излучения в атмосфере; w – коэффициент, зависящий от соотношения величин $A_{\text{лаз}}$ и $A_{\text{об}}$; t – время, c – скорость света, L и G – функции, описывающие временные зависимости интенсивности излучения лазерной подсветки и чувствительности (коэффициента усиления) приемного блока (строб-импульса).

Величину коэффициента w в соответствии с так называемой основной формулой лазерной дальнометрии [8] для случая, когда $A_{\text{лаз}}$ превышает $A_{\text{об}}$, запишем в виде:

$$w = A_{\text{об}}/A_{\text{лаз}} \quad (2)$$

Если $A_{\text{лаз}} < A_{\text{об}}$, тогда принимается: $w = 1$. Площадь сечения лазерного пучка подсветки в плоскости объекта наблюдения, расположенного на расстоянии $S_{\text{об}}$, можно вычислить с помощью выражения:

$$A_{\text{лаз}} = \pi \gamma_{\text{лаз}}^2 S_{\text{об}}^2 / 4, \quad (3)$$

где $\gamma_{\text{лаз}}$ – половинный угол расходимости пучка лазерной подсветки (половина плоского угла при вершине кругового конуса с осью, совпадающей с оптической осью пучка, в котором распространяется заданная доля энергии излучения).

Выражение (1) справедливо при условии, что пучок излучения на максимальной рабочей дальности полностью находится в поле зрения приемной оптической системы.

В дальнейшем множитель

$$E_{\text{св}} = \int L(t - 2S/c) G(t - \Delta t_{\text{зад}}) dt, \quad (4)$$

обусловленный физическим принципом работы АИСВ, будем называть множителем-сверткой, а множитель

$$E_{\text{пр}} = S^2 \exp(-2\alpha S) - \quad (5)$$

пространственным, поскольку он в явном виде учитывают расстояние.

Известно, что в АИСВ существует так называемый шумовой порог [2]. Это означает, что даже в отсутствие входного излучения в приемном канале присутствует сигнал, соответствующий шумовому порогу. Поставим ему в соответствие, аналогично [7], некоторое значение энергии шумового порога $E_{\text{шп}}$. В дальнейшем при вычислении величины сигналов E при использовании выражения (1) учитывается, что значение E не может быть меньше $E_{\text{шп}}$.

2. Результаты расчетов и их обсуждение

Расчеты выполнены для следующих параметров: формы импульса лазерной подсветки и строб-импульса являются прямоугольными; $E_{\text{шп}} = 1 \cdot 10^{-12}$ Дж; $G_m = 40000$ (амплитуда прямоугольной функции G); $\Delta t_{\text{лаз}} = 100$ нс; $\Delta t_{\text{фп}} = 200$ нс; $S_{\text{зад}} = c\Delta t_{\text{зад}}/2 = 100$ м.

На рис. 1 приведены зависимости величин E и $E_{\text{св}}$ для фиксированного диаметра объекта $D_{\text{об}} = 30$ м и варьировании половинного угла расходимости $\gamma_{\text{лаз}}$ пучка лазерной подсветки. Для возможности сопоставления в одном масштабе приведены кривые для E и $E_{\text{св}}$. В подписи к рисунку E_m указывает максимальное значение регистрируемого сигнала, которое достигается в пределах ЗВ на расстоянии S_m . Граничное расстояние $S_{\text{гр}}$ равно расстоянию, где $A_{\text{лаз}} = A_{\text{об}}$. При $S > S_{\text{гр}}$ выполняется неравенство: $A_{\text{лаз}} > A_{\text{об}}$. Таким образом, все выполненные ранее для АИСВ расчеты соответствуют случаю, когда $A_{\text{лаз}} \leq A_{\text{об}}$. Другими словами можно сказать, что при этом ЗВ расположена на дистанции таким образом, что $S_{\text{кон}} < S_{\text{гр}}$ ($S_{\text{кон}}$ – конечная точка (имеющая максимальное значение) ЗВ). Для сведения также приводятся значения длин ЗВ $\Delta S_{\text{ЗВ}}$, полученные при расчетах.

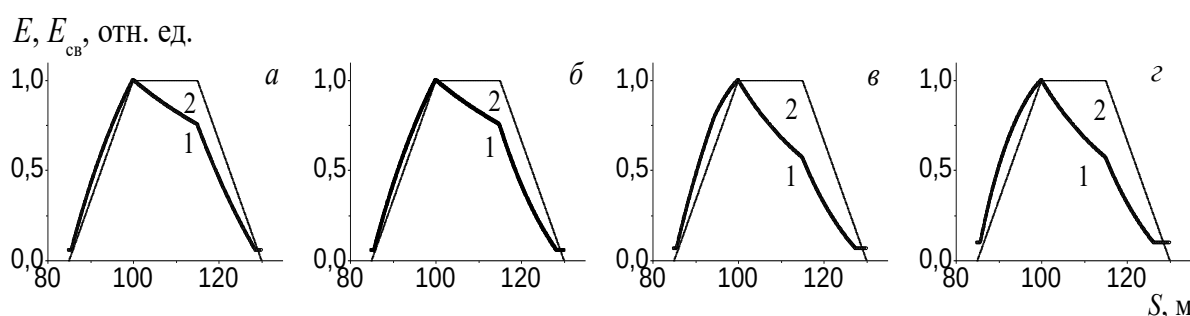


Рис. 1. Зависимости величин E (1) и $E_{\text{св}}$ (2) от расстояния S ; $D_{\text{об}} = 30$ м; $\gamma_{\text{лаз}} = 6$ (а), 8 (б), 9 (в) и 11 град (г); $E_m = 1,8 \cdot 10^{-11}$ (а), $1,8 \cdot 10^{-11}$ (б), $1,6 \cdot 10^{-11}$ (в) и $1,1 \cdot 10^{-11}$ Дж (г); $S_{\text{гр}} = 143$ (а), 107 (б), 96 (в) и 78 м (г); $\Delta S_{\text{ЗВ}} = 43,0$ (а), 42,4 (б), 41,9 (в) и 40,6 м (г)

На примере рис. 1, а поясним, что обычно расстояния $S_{\text{нач}} = 96$ м и $S_{\text{кон}} = 129$ м называют начальной и конечной точками ЗВ [9]. При $\Delta t_{\text{лаз}} < \Delta t_{\text{фп}}$ расстояния

$S_{\text{нач-100\%}} = S_{\text{зад}} = 100$ м и $S_{\text{кон-100\%}} = 115$ м – это начальная и конечная точки интервала, в пределах которого регистрируется 100% длительности импульса подсветки.

Таким образом, с учетом сказанного, рис. 1, *а* соответствует случаю проводившихся ранее расчетов ($A_{\text{лаз}} < A_{\text{об}}$), поскольку $S_{\text{гр}} > S_{\text{кон}}$. Для рис. 1, *б* $S_{\text{гр}} < S_{\text{кон}}$, но больше расстояния $S_{\text{м}}$. Поэтому величины $E_{\text{м}}$ в обоих случаях одинаковые. При дальнейшем увеличении $\gamma_{\text{лаз}}$ (рис. 1, *в*) $S_{\text{гр}} = 96$ м $< S_{\text{зад}} = 100$ м. При $\Delta t_{\text{лаз}} < \Delta t_{\text{фп}}$ в точке $S_{\text{зад}}$ всегда достигается максимальное значение сигнала $E_{\text{м}}$. Поэтому несколько уменьшилось максимальное значение сигнала: $E_{\text{м}} = 1,6 \cdot 10^{-11}$ Дж. Наконец, рис. 1, *г* иллюстрирует ситуацию, когда $S_{\text{гр}} < S_{\text{нач}}$ (но $S_{\text{гр}}$ близко к $S_{\text{нач}}$). Это ведет к более существенному уменьшению максимума сигнала: $E_{\text{м}} = 1,1 \cdot 10^{-11}$ Дж.

На рис. 2 приведены аналогичные зависимости для величин E и $E_{\text{св}}$ для разных размеров объекта при фиксированном половинном угле расходимости $\gamma_{\text{лаз}} = 10$ град пучка лазерной подсветки.

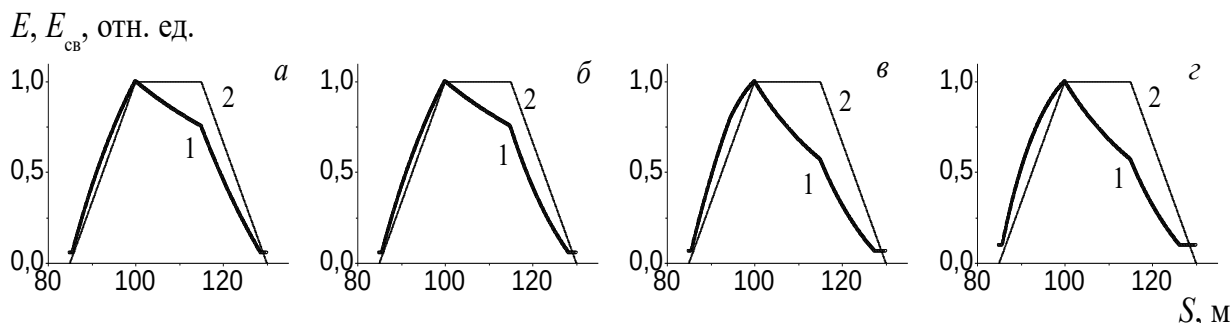


Рис. 2. Зависимости величин E (1) и $E_{\text{св}}$ (2) от расстояния S ; $\gamma_{\text{лаз}} = 10$ град; $D_{\text{об}} = 46$ (а), 40 (б), 33 (в) и 27 м (г); $E_{\text{м}} = 1,8 \cdot 10^{-11}$ (а), $1,8 \cdot 10^{-11}$ (б), $1,6 \cdot 10^{-11}$ (в) и $1,0 \cdot 10^{-11}$ Дж (г); $S_{\text{гр}} = 132$ (а), 114 (б), 94 (в) и 77 м (г); $\Delta S_{\text{ЗВ}} = 43,0$ (а), 42,6 (б), 41,8 (в) и 40,6 м (г)

Для рис. 2, *а* $S_{\text{гр}} (132 \text{ м}) > S_{\text{кон}} (129 \text{ м})$ и поэтому достигаются максимальные значения $E_{\text{м}}$ и $\Delta S_{\text{ЗВ}}$. Приближение $S_{\text{гр}}$ к характерной точке $S_{\text{кон-100\%}}$ (рис. 2, *б*) практически не оказало влияния на величину $E_{\text{м}}$. Однако значение $\Delta S_{\text{ЗВ}}$ при этом, как и следовало ожидать, несколько уменьшилось. На рис. 2, *в*, где $S_{\text{гр}}$ несколько меньше характерной точки $S_{\text{зад}} = S_{\text{м}}$, наблюдается более существенное уменьшение величин $E_{\text{м}}$ и $\Delta S_{\text{ЗВ}}$. При дальнейшем уменьшении $D_{\text{об}}$ граничное расстояние располагается перед началом зоны видимости (рис. 2, *г*). В этом случае часть энергии подсветки безвозвратно теряется в пределах всей ЗВ и имеет место более существенное уменьшение значений $E_{\text{м}}$ и $\Delta S_{\text{ЗВ}}$.

Кратко обобщить полученные результаты можно следующим образом. Учет изменения соотношения между площадью поперечного сечения луча подсветки в плоскости объекта $A_{\text{лаз}}$ и площадью поперечного сечения наблюдаемого объекта $A_{\text{об}}$ в ряде случаев является важным с практической точки зрения. Особый интерес представляет ситуация, когда величина отношения $w = A_{\text{об}}/A_{\text{лаз}}$ изменяется не только в пределах зоны видимости, но и прилегающих к начальной и конечной точкам ЗВ. На практике наиболее часто реализуется следующая ситуация. При наблюдении условно на близких дистанциях, соответствующих $w = 1$ ($A_{\text{лаз}} \leq A_{\text{об}}$ или

$S_{гр} > S_{кон}$), учет w не оказывает влияния на основные параметры ПЭП. Ранее в литературе исследования проводились именно для этого случая. При увеличении дистанций наблюдения, что соответствует перемещению $S_{гр}$ от конечной точки зоны видимости $S_{кон}$ к начальной $S_{нач}$, а затем в область меньших расстояний, влияние параметра w возрастает, поскольку его значение может изменяться от 1 до предельно минимального, соответствующего нулю. В реальных условиях в указанном диапазоне обычно наблюдается уменьшение максимального значения регистрируемого сигнала, а также длины зоны видимости. Учет множителей w и $E_{пр}$ ведет к «удалению» кривой E для сигнала от кривой E_m при $S > S_{зад}$. Наиболее наглядно это удаление проявляется в окрестности точки $S_{кон-100\%}$.

Библиографические ссылки

1. Гейхман И. Л., Волков В. Г. Основы улучшения видимости в сложных условиях, Москва, ООО «Недра-Бизнесцентр», 1999.
2. Карасик В. Е., Орлов В. М. Лазерные системы видения: Учебное пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001.
3. Волков В. Г., Случак Б. А. Новые лазерные приборы наблюдения // Контенант. 2016. Т. 15, № 3. С. 62–70.
4. Goehler B., Lutzmann P. Review on short-wavelength infrared laser gated-viewing at Fraunhofer IOSB // Optical Engineering. 2017. Vol. 56(3). P. 031203.
5. Laurenzis M., Bacher E. Image coding for three-dimensional range-gated imaging. // Appl. Optics. 2011. Vol. 50, N 21. P. 3824–3828.
6. Three-dimensional range-gated flash LIDAR for land surface remote sensing / X. Wang [et al.] // Proc. SPIE. 2014. Vol. 9260. P. 92604L.
7. Кунцевич Б. Ф. Сравнение пространственно-энергетических профилей зон видимости активно-импульсных систем видения для двух способов наблюдения / Б. Ф. Кунцевич, И. Н. Пучковский, С. С. Шавель // Журн. прикл. спектр. 2023. Т. 90, № 5. С. 795–805.
8. Балашов И. Ф. Энергетическая оценка импульсных лазерных дальномеров (Пособие по методике инженерных расчетов). СПб, ГИТМО(ТУ), 1999.
9. Закономерности формирования изображения и определение расстояния до объекта при его движении относительно активно-импульсной системы видения / В. А. Горобец [и др.] // Журн. прикл. спектр. 2015. Т. 82, № 1. С. 68–75.
10. Кабашиников В. П., Кунцевич Б. Ф. Коррекция неравномерной яркости изображения в активно-импульсных системах с автосканированием. Сборник научных статей I международной научно-технической конференции «ОПТО-, МИКРО- и СВЧ-электроника – 2018», Минск, 22–26 октября 2018 г. Минск, 2018. С. 256–259.