

# ВЛИЯНИЕ АТМОСФЕРНЫХ УСЛОВИЙ НА КОНТРАСТ ИЗОБРАЖЕНИЯ В ЛАЗЕРНЫХ СИСТЕМАХ ВИДЕНИЯ СО СТРОБИРОВАНИЕМ

Тарасенков М.В., Белов В.В., Пешков С.А., Познахарев Е.С.

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск, Россия

e-mail: [TMV@iao.ru](mailto:TMV@iao.ru), [Belov@iao.ru](mailto:Belov@iao.ru), [S\\_Peshkov@list.ru](mailto:S_Peshkov@list.ru), [724\\_pes1992@iao.ru](mailto:724_pes1992@iao.ru)

Исследуется влияние атмосферных условий на контраст изображения в системах видения со стробированием с использованием метода статистического моделирования. Рассматривается, как меняется контраст изображений, при работе системы в условиях высокой мутности атмосферы. Предложена усовершенствованная методика расчета на основе алгоритма Монте-Карло, учитывающая отражение от земной поверхности и объекта, загораживание приемника, а также влияние мутной среды. Проведено численное моделирование, показавшее зависимость контраста от расстояния до объекта и атмосферных условий. Результаты демонстрируют снижение контраста с увеличением дистанции, а также влияние параметров стробирования на качество изображения.

*Ключевые слова:* лазерные системы видения со стробированием, контраст изображения, мутная атмосфера, метод Монте-Карло.

**Введение.** Современные активные системы видения с лазерной подсветкой сталкиваются с серьезными ограничениями при работе в условиях высокой мутности атмосферы, вызванной туманом, дымом или осадками. Основная проблема заключается в значительном рассеянии и поглощении лазерного излучения, что приводит к снижению контраста и ухудшению качества получаемых изображений. Для преодоления этих ограничений активно применяются методы стробирования, позволяющие минимизировать влияние рассеянного света и повысить четкость изображения. Подобные системы находят применение в различных областях, включая мониторинг подводных объектов [1], наблюдение в условиях дождя и тумана [2, 3], а также построение высокоточных трехмерных моделей окружающей среды [4]. Однако, несмотря на активное развитие технологий стробирования, вопросы, связанные с коррекцией атмосферных искажений, остаются недостаточно изученными.

В ИОА СО РАН накоплен значительный опыт исследований в данной области. В предыдущих работах [5, 6] было установлено, что использование систем со стробированием позволяет улучшить качество изображений почти на порядок. Кроме того, было показано, что ключевыми факторами, влияющими на результат, являются не только расстояние до объекта, но и параметры аэрозольных частиц, такие как их размер, коэффициент рассеяния и поглощения. Также выявлено, что при оптической толщине трассы  $\tau \geq 3$  контраст изображения в дыме превышает аналогичный показатель для тумана, а увеличение длительности импульса подсветки негативно сказывается на качестве получаемых данных. В выполненной работе создана программа метода Монте-Карло, позволяющая анализировать, как мутная среда влияет на качество изображений (контраст). В дальнейшем, созданная программа позволит выполнять атмосферную коррекцию изображений, полученные системой видения со стробированием.

**Постановка задачи и решение.** Задача решается в следующей постановке (Рисунок 1). Предположим, что перенос излучения происходит в плоской системе атмосфера – земная поверхность. Атмосфера является поглощающей и рассеивающей аэрозольно-газовой средой, параметры которой задаются генератором оптических моделей LOWTRAN-7 [7]. Земная поверхность отражает излучение по закону Ламберта и имеет коэффициент отражения  $r_{surf}$ . В атмосфере располагается объект, границы которого задаются треугольными гранями с координатами вершин  $(x_{obj,i,1}, y_{obj,i,1}, z_{obj,i,1})$ ,  $(x_{obj,i,2}, y_{obj,i,2}, z_{obj,i,2})$ ,  $(x_{obj,i,3}, y_{obj,i,3}, z_{obj,i,3})$   $i = \overline{1, I}$  ( $I$  – количество граней). Каждая грань объекта отражает излучение по закону Ламберта и имеет коэффициент отражения  $r_{obj,i}$ . В качестве тест-объекта рассматривается радикальная мира, состоящая из 72 треугольников, половина из которых имеет коэффициент отражения  $r_{obj,1}$ , а половина  $r_{obj,2}$ . В некоторой точке  $S$  на высоте  $h_S$  от поверхности земли располагается источник лазерного излучения, оптическая ось которого направлена в направлении  $\omega_s$ . Излучение имеет горизонтальную расходимость  $\nu_s$  и вертикальную расходимость  $\nu_d$ . Источник посылает излучение единичной энергии и нулевой длительности ( $\delta(t)$  – импульс). В некоторой точке  $D$  (в выполненных тестовых расчетах совпадала с  $S$ ) располагается точечный приемник, расположенный на высоте  $h_d$ . Поле зрения состоит из  $J_1$  чувствительных элементов по горизонтали, и  $J_2$  чувствительных элементов по вертикали (всего  $J = J_1 * J_2$  элементов). Приемная система является системой со стробированием. Заданы ширина строба  $\Delta T$  и глубина строба  $\Delta t$ . Требуется определить принимаемое изображение в зависимости от оптико-геометрических условий, и исходя из полученных изображений, рассчитать его контраст.

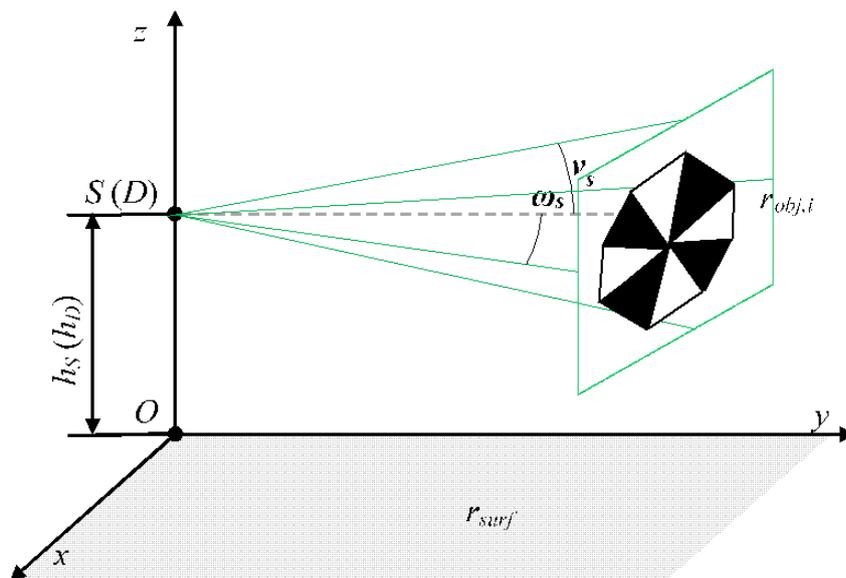


Рисунок 1 – Геометрическая схема постановки задачи

**Метод решения задачи.** В основу был взят усовершенствованный алгоритм моделирования метода Монте-Карло с локальными оценками в точке столкновения, разработанный в нашей предыдущей работе [8].

В данной работе этот алгоритм был дополнительно модернизирован и расширен следующими ключевыми улучшениями:

1. Добавлен расчет контраста изображения.
2. Изменение геометрии поля зрения: 1) переход от круговой к прямоугольной форме поля зрения; 2) модификация алгоритма расчета для работы с прямоугольной апертурой; 3) учет новых граничных условий при моделировании траекторий фотонов.

Для количественной оценки различий между сигналами, отражёнными от разных групп поверхностей, использовался параметр контраста  $K$ , определяемый по формуле:

$$K = \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} \quad (1)$$

где:  $I_1$  — средняя интенсивность сигнала, зарегистрированного от нечётных поверхностей (группа 1),  $I_2$  — средняя интенсивность сигнала, зарегистрированного от чётных поверхностей (группа 2).

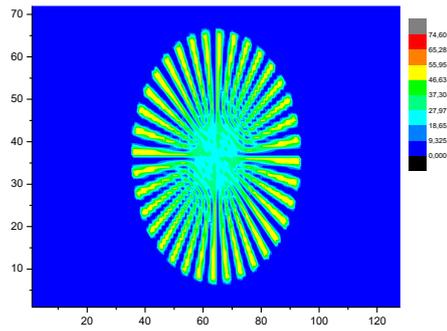
**Результаты расчетов.** Был выполнен тестовый расчет разработанной программой при следующих оптико-геометрических условиях: число траекторий  $N=10^7$ , число пачек траекторий  $M=30$ , длина волны  $\lambda=0.4$  мкм, метеорологическая дальность видимости  $S_M=1$ ,  $r_{surf}=1$ ,  $h_s=h_d=1$ м;  $\omega_s = (0,1,0)$ ;  $\nu_s=3^\circ$ ;  $\nu_d=1,65^\circ$ ;  $J=9216$  ( $J_1=128$ ,  $J_2=72$ ). Полученные изображения приведены на рисунке 2, а полученный контраст на рисунке 3.

**Заключение.** Созданный алгоритм позволил количественно оценить влияние атмосферных условий, геометрии системы и параметров стробирования на контраст изображения в активных системах видения с лазерной подсветкой.

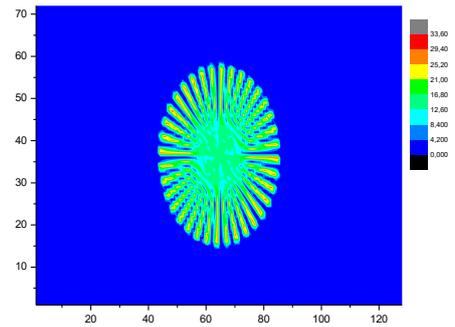
В ходе численного моделирования были получены следующие ключевые результаты:

1. При увеличении расстояния до объекта наблюдалось монотонное снижение контраста изображения (рисунок 3).
2. Ухудшение контраста связано с ростом влияния рассеянного излучения и снижением доли полезного сигнала.

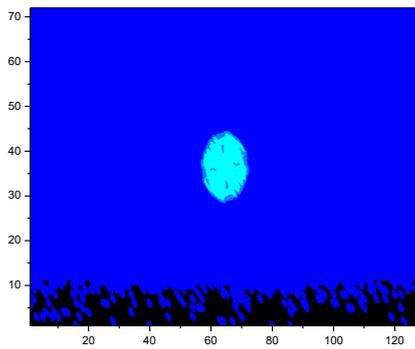
Работа выполнена в рамках госзадания ИОА СО РАН № FWRU-2021-0002.



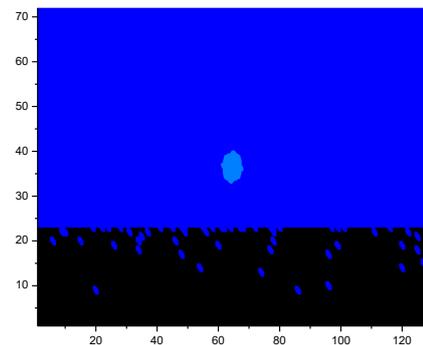
а)



б)



в)



г)

Рисунок 2 – Полученные изображения. Метеорологическая дальность видимости  $S_M=1$  км, на расстоянии: а) 13м; б) 18м; в) 50м; г) 100м.

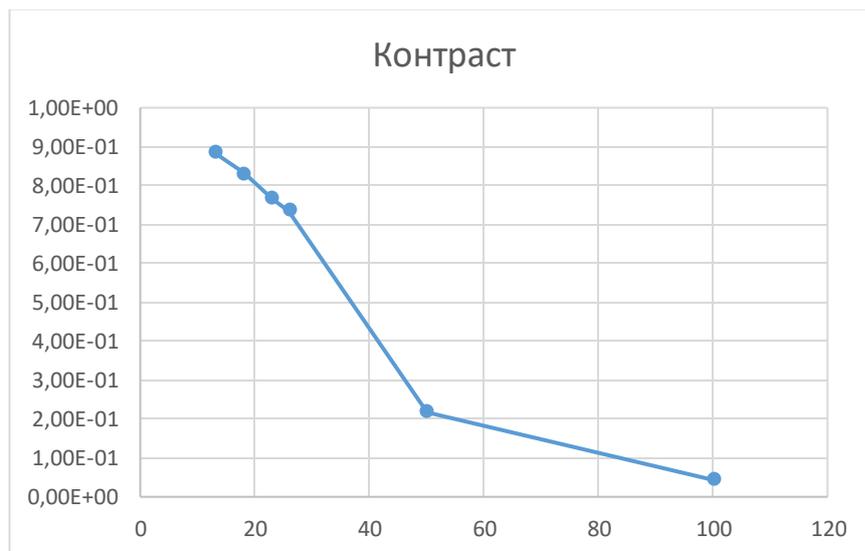


Рисунок 3 – Зависимость контраста К от расстояния

1. *Mariani P., Quincoces I., Haugholt H. K., Chardard Y., Visser A. W., Yates Y., Piccinno G., Reali G., Risholm P., Thielemann J. T.* Range-gated imaging system for underwater monitoring in ocean environment // *Sustainability*. 2019. V. 11. № 1. Article 162.
2. *Willitsford A., Brown D., Baldwin K., Hanna R., Marinello L.* Range-gated active short-wave infrared imaging for rain penetration // *Optical Engineering*. 2020. V. 60. № 1. P. 013103-1 – 013103-11.
3. *Laurenzis M., Christnacher F., Monnin D., Scholz T.* Investigation of range-gated imaging in scattering environments // *Optical Engineering*. 2015. V. 51. № 6. P. 061303-1 – 061303-6.
4. *Laurenzis M., Christnacher F., Monnin D.* Long-range three-dimensional active imaging with superresolution depth mapping // *Optics letters*. 2007. V. 32. № 21. P. 3146–3149.
5. *Belov, V.* Statistical modeling of imaging process in active night vision systems with gate-light detection // *Appl Phys B*. 2002. V.75. P. 571–576.
6. *Белов В.В., Абрамочкин В.Н., Гриднев Ю.В., Кудрявцев А.Н., Козлов В.С., Рахимов Р. Ф., Шмаргунов В.П., Тарасенков М.В.* Экспериментальные исследования влияния оптических характеристик среды на качество изображения в ОЭС видения с селекцией помехи обратного рассеяния // *Оптика атмосферы и океана*. 2017. Т. 30. № 04. С. 285–290.
7. *Kneizys F.X., Shettle E.P., Anderson G.P., Abreu L.W., Chetwynd J.H., Selby J.E.A., Clough S.A., Gallery W.O.* User Guide to LOWTRAN-7. ARGL-TR-86- 0177. ERP 1010 / Hansom AFB. MA 01731.
8. *Тарасенков М.В., Белов В.В., Пешков С.А., Познахарев Е.С.* Статистическое моделирование формирования изображений в системах видения со стробированием в условиях мутной среды // *Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы: Материалы XXX Международного симпозиума, г. Санкт-Петербург, 01-05 июля 2024 г. – Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2024. С. 194-200. DOI: 10.56880/OAO30A35.*