

Экспериментальные исследования влияния оптических характеристик среды на качество изображения в ОЭС видения с селекцией помехи обратного рассеяния

В.В. Белов, В.Н. Абрамочкин, Ю.В. Гриднев, А.Н. Кудрявцев,
В.С. Козлов, Р.Ф. Рахимов, В.П. Шмаргунов, М.В. Тарасенков*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 16.12.2016 г.

Рассмотрены результаты экспериментального исследования влияния мутных сред (туман, дым) на качество изображения объектов, наблюдаемых через них с помощью активно-импульсных оптико-электронных систем (ОЭС), работающих в режимах с постоянно открытым приемником и с его управлением (режим селекции помехи обратного рассеяния). Экспериментально подтверждено, что для активно-импульсных ОЭС с селекцией помехи обратного рассеяния качество изображений объектов, экранированных мутными средами, может быть почти на порядок выше, чем при работе с постоянно открытым приемником. На качество изображения объектов в системах видения с управляемым приемом влияют не только оптическая протяженность трассы наблюдения, но и средние размеры частиц, а также их рассеивающие и поглощающие свойства.

Ключевые слова: активно-импульсные ОЭС с управляемым приемником, частотно-контрастные характеристики, мира, дым, туман, лабораторные эксперименты; active pulsed OES with controllable receiver, frequency-contrast characteristics, mires, smoke, fog, laboratory experiments.

Введение

Одно из направлений развития оптико-электронных систем (ОЭС) формирования изображений через рассеивающие и поглощающие среды связывают с ОЭС с селекцией помехи обратного рассеяния (со стробированием приемника) [1–5]. Такие системы создают 2D-изображения ограниченного слоя пространства, удаленного от оператора на заданное расстояние. Эта же технология может быть использована и для построения 3D-изображений в задачах дистанционной идентификации личности [6], безопасности движения автотранспорта [3, 7], в создании подводных ОЭС видения [8]. Существует другая технология формирования 3D-изображений пространства без управления приемником с помощью электронных затворов или иных способов, переводящих приемник в режим «закрыто»/«открыто». Она связана с применением матриц лавинных фотодиодов, позволяющих фиксировать развертку по времени $p_i(t; x_i, y_i)$ интенсивности

светового потока, приходящего в фиксированном направлении ω_i , как реакцию на излученный источником лазерный импульс в пределах поля зрения приемной системы. Записав в память компьютера развертку $p_i(t; x_i, y_i)$, можно выделить 2D-изображение j -го слоя пространства, удаленного от источника на расстояние $z_j = ct_j/2$ (начало отсчета времени совпадает с моментом посылки лазерного импульса источником), и тем самым решить, например, проблему селекции помехи обратного рассеяния.

В данной работе рассмотрены результаты экспериментального лабораторного исследования влияния помехи обратного рассеяния на контрастно-частотные характеристики системы видения со стробированием приемника на примере ОЭС видения «Зонд М+», являющейся модификацией ОЭС «Зонд» [4].

Аппаратура, цели и содержание экспериментов

В состав активной ОЭС «Зонд М+» (рис. 1) входят следующие элементы: источник излучения — полупроводниковый лазер Л-13 (импульсная пиковая мощность 385 мВт; центр линии излучения 810 нм, полуширина 10 нм; длительность импульса на уровне 0,1 регулируется от 40 до 120 нс с шагом 10 нс; частота повторения импульсов 5,2 кГц); оптические элементы, с помощью которых начальная

* Владимир Васильевич Белов (belov@iao.ru); Владимир Николаевич Абрамочкин (ya.wna@yandex.ru); Юрий Владимирович Гриднев (yuri@iao.ru); Андрей Николаевич Кудрявцев (zoxu1@iao.ru); Валерий Степанович Козлов (vkozlov@iao.ru); Рустам Фуатович Рахимов (temur@iao.ru); Владимир Петрович Шмаргунов; Михаил Викторович Тарасенков (tmv@iao.ru).

расходимость излучения и поле зрения приемной системы ограничены 12° ; усилитель оптического излучения – оптико-электронный преобразователь (ЭОП) ЭПМ132Г-00-22С; цифровая камера VAI-136-USB (<http://www.evs.ru/news.php?nw=126>), на которую сначала изображение передается с ЭОП, а затем записывается на компьютер и отображается на мониторе. Управление режимом работы ЭОП («закрыто»/«открыто») осуществляется подачей стробирующего импульса на его фотокатод. В [4] подробно описана последовательность работы такой ОЭС. Она может работать в трех режимах: (А) без лазерной подсветки; (Б) с подсветкой, приемник постоянно открыт и (В) с лазерной импульсной подсветкой и со стробированием (управлением) приемника.



Рис. 1. Внешний вид основного блока ОЭС «Зонд М+»

Эксперименты проведены в Большой аэрозольной камере ИОА СО РАН объемом 2000 м^3 (<http://www.iao.ru>, раздел «Ресурсы»). Она снабжена иллюминаторами для ввода в нее и регистрации оптического излучения. Внутренняя поверхность камеры покрыта светопоглощающей краской, поэтому отражением от ее внутренней поверхности можно пренебречь. В качестве тест-объектов использованы пять радиальных мир с внешним радиусом 31 см с 36 парами черно-белых секторов. Миров размещалась на расстояниях 7, 13, 18, 23, 26 м от иллюминатора.

Рассеивающая и поглощающая (РП) среда создавалась в камере в виде дыма путем пиролиза сосновых брусков (общей массой 1 кг) и тумана, образованного распылением водно-глицериновой смеси «i-fogTM» генератором аэрозольных частиц ANTARI-Z800-II. Оптическо-микрофизическое состояние рассеивающей среды контролировалась по результатам обращения данных поляризационных спектрофелометрических измерений [9, 10] через каждый час в течение экспериментов, выполняемых с 12:00 до 20:00 местного времени 6 июня с дымом и 9 июня с туманом. Отметим, что в дымовой среде скорость уменьшения ее оптической плотности в течение экспериментов была существенно меньше,

чем в случае модельного тумана. За время экспериментов оптическая протяженность среды τ вдоль линии визирования, от иллюминатора до мира, удаленной на 23 м, уменьшилась с 3,12 до 1,91 в дымовой среде и с 3,73 до 1,03 в тумане.

Цель экспериментов состояла в исследовании влияния оптических характеристик на качество изображений при управлении режимом работы приемника («закрыто»/«открыто»). Качество изображений оценивалось по фрагменту частотно-контрастной характеристики (ЧКХ) системы видения. Подчеркнем, что ЧКХ системы видения в целом мультипликативно включает в себя ЧКХ оптического блока без учета влияния среды и ЧКХ идеального варианта этого блока с учетом влияния среды. В подобных экспериментах определить ЧКХ системы видения во всем диапазоне пространственных частот невозможно, так как мира всегда ограничена в размерах, поэтому ЧКХ определяется только в ограниченном диапазоне частот.

В использованной в экспериментах видеокамере VAI-136-USB встроен блок автоматической регулировки усиления. Очевидно, что он не влияет на контраст изображения (следовательно, и на ЧКХ системы видения). Однако КМОП-матрица, используемая в этой видеокамере, характеризуется цифровым шумом, который ухудшает качество изображения, особенно при низкой интенсивности полезного сигнала.

Эксперименты состояли в следующем.

Шаг 1. Через иллюминатор осуществлялась регистрация изображения мира без стробирования приемника при ее импульсной лазерной подсветке в отсутствие модельной РП-среды. Это соответствовало работе типичной активной импульсной лазерной ОЭС.

Шаг 2. В камере генерировалась РП-среда.

Шаг 3. С момента достижения максимальной плотности среды ежесекундно регистрировались изображения мира в режимах со стробированием приемника и без него. Каждый эксперимент длился не менее 6 ч.

Шаг 4. Обработка результатов экспериментов.

Обработка экспериментальных данных

Поскольку одиночные изображения характеризуются довольно высоким уровнем шумов, использовано усреднение по 100 кадрам. Среднее, дисперсия (или среднеквадратичное отклонение) для яркости каждого пикселя вычисляются по стандартным формулам. При малых уровнях освещенности проявляются систематические погрешности оценок ЧКХ, связанные с камерой, ЭОП и возможными наводками от лазерного источника. Для минимизации этих погрешностей предприняты следующие действия. Фиксируется усредненное изображение мира с фоном (рис. 2, а) и изображение аппаратного фона при предельно малом уровне освещенности (рис. 2, б), при котором проявляются только аппаратные погрешности.

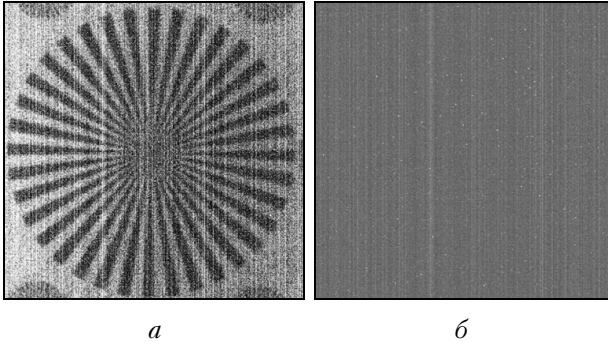


Рис. 2. Пример изображения миры при низком уровне сигнала (а) и фонового изображения (б) при закрытой камере

Из изображения миры с фоном вычитается фоновое с некоторым коэффициентом. Коэффициент определяется с учетом того, что фоновое изображение состоит в основном из вертикальных линий. Далее суммируются яркости пикселей каждой вертикальной линии и в полученной последовательности сумм устраняется тренд с помощью сглаживающего сплайна. Аналогичные действия осуществляются с изображением миры на аппаратурном фоне. Искомый коэффициент C вычисляется при минимизации функции

$$f = \sum_{i=1}^n (X_i^t - CX_i^f)^2, \quad (1)$$

где X_i^t — i -й элемент последовательности суммы яркостей пикселей изображения миры, X_i^f — i -й элемент последовательности суммы яркостей пикселей фонового изображения.

Затем формируется скорректированное изображение (рис. 3):

$$I_c = I_t - CI_f. \quad (2)$$

Здесь I_t — исходное изображение; C — найденный коэффициент; I_f — фоновое изображение.

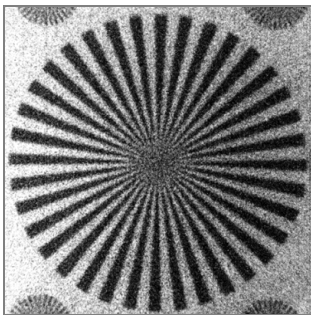


Рис. 3. Пример скорректированного изображения миры при ее низкой освещенности

Полученное изображение представляет собой результат косвенных измерений, поскольку и изображение миры, и фоновое изображение имеют свои доверительные интервалы.

Общий подход к вычислению доверительных интервалов косвенных измерений изложен в [11]:

$$\Delta(f(a, b, \dots, x)) = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial a} \Delta a\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial b} \Delta b\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x} \Delta x\right)^2}, \quad (3)$$

где $\Delta(f(a, b, \dots, x))$ — доверительный интервал вычисляемой функции; $\frac{\partial f}{\partial a}, \frac{\partial f}{\partial b}, \dots, \frac{\partial f}{\partial x}$ — частные производные по соответствующим аргументам; $\Delta a, \Delta b, \dots, \Delta x$ — доверительные интервалы соответствующих аргументов. Из формулы (3) следует, что доверительный интервал скорректированного изображения для яркости каждого пикселя

$$\Delta I_c = \sqrt{(\Delta I_t)^2 + (\Delta I_f)^2}. \quad (4)$$

Оценка частотно-контрастных характеристик

Вычисление контрастов осуществлено по формуле

$$k = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}, \quad (5)$$

где k — контраст; I_{\max} — максимальное, I_{\min} — минимальное значение яркости пикселя. Использование в качестве максимума и минимума значений яркостей отдельных пикселей изображения приводит к неустойчивости оценки контраста из-за дефектов камеры, ЭОП, погрешностей изготовления миры и т.д. Поскольку темные и светлые сектора миры имеют примерно одинаковую отражательную способность в своем классе, то более устойчивой представляется оценка по следующему алгоритму. Определяем среднее значение яркости изображения по заданному радиусу и считаем, что значения интенсивности ниже среднего относятся к темным секторам, а выше среднего — к светлым; затем усредняем соответствующие значения следующим образом.

Находим I_r^{\min} — среднее значение яркости пикселей темных секторов для радиуса r и $disp_r^{\min}$ — дисперсию величины I_r^{\min} :

$$I_r^{\min} = \frac{1}{m_{\min}} \sum_{i=1}^{m_{\min}} I_{ir}^{\min}; \quad (6)$$

$$disp_r^{\min} = \frac{1}{m_{\min}} \sum_{i=1}^{m_{\min}} disp_{ir}^{\min}, \quad (7)$$

где m_{\min} — количество пикселей темных секторов для радиуса r ; I_{ir}^{\min} — значение яркости одиночного пикселя темных секторов для радиуса r ; $disp_{ir}^{\min}$ — дисперсия величины I_{ir}^{\min} . Аналогично определяем I_r^{\max} — среднее значение яркости пикселей светлых секторов для радиуса r и $disp_r^{\max}$ — дисперсию величины I_r^{\max} .

Для оценки погрешности вычисления контраста сформируем функции

$$u = I_r^{\max} - I_r^{\min}; \quad (8)$$

$$v = I_r^{\max} + I_r^{\min}. \quad (9)$$

Тогда дисперсия контраста определяется следующим выражением:

$$disp_k = \frac{1}{v^2} disp_u + \frac{u^2}{v^4} disp_v. \quad (10)$$

Расчет пространственной частоты в зависимости от радиуса r и количества пар секторов n_l осуществляем по формуле

$$\omega = \frac{n_l}{r}. \quad (11)$$

Результаты экспериментов и их обсуждение

Обсуждаемые ниже результаты относятся к наблюдению миры, удаленной на расстояние $l = 23$ м от иллюминатора. Пятая мира располагалась на задней стенке камеры, и влияние на ее изображение слоя рассеивающей среды за ней отсутствовало, что можно интерпретировать как уменьшение длительности строба. Результаты экспериментов, полученные для промежуточных значений l , смысла обсуждать нет, так как они предсказуемы по сравнению с полученными для $l = 23$ м.

На рис. 4 представлены примеры ЧКХ в ограниченном (размерами миры) диапазоне частот, полученные для двух дисперсных сред: тумана (рис. 4, а) и дыма (рис. 4, б). В легенде на поле рисунков приведено текущее время измерений в часах, цифра 0 соответствует регистрации изображений без дисперсной среды в аэрозольной камере. Отсутствие слова «строб» у цифры соответствует регистрации изображений в режиме Б (лазерная подсветка, приемник постоянно открыт); добавление к цифре слова «строб» означает, что регистрация изображений осуществлена в режиме стробирования ЭОП (режим В).

Из данных рис. 4 следует, что в режиме В качество изображений существенно выше, чем в режиме Б. Наиболее существенно это улучшение проявляется для дымовой среды. Преимущества активных ОЭС со стробированием перед системами с постоянно открытым приемником отмечены и оценены в работе [3], где описаны результаты моделирования методом Монте-Карло процесса формирования изображений фиксированного тест-объекта, наблюдаемого через РП-среды с помощью идеальной ОЭС. Как видим, этот же результат наблюдается и при формировании изображений реальной оптической системой и конкретными блоками ОЭС видения. Выбросы значений контрастов изображений миры на рис. 4 обусловлены шумами электронных блоков ОЭС (ЭОП, видеокамера). Преимущество работы ОЭС в режиме В по сравнению с режимом Б становится очевидным, если сравнить значения ЧКХ, полученные в этих режимах. Это преимущество

возрастает с уменьшением пространственной частоты (т.е. с ростом характерных размеров наблюдаемых объектов). Меньшие различия между ЧКХ характерны для среды «туман» при оптической протяженности трассы наблюдения $\tau > 3,5$. Однако при $\tau \rightarrow 1$ (см. рис. 4, а, кривая «17 строб») значения ЧКХ для $\ln \omega = -0,75$ в режиме С почти в 5 раз выше, чем в режиме Б. Для дымовой среды преимущества режима В более заметны (см. рис. 4, б).

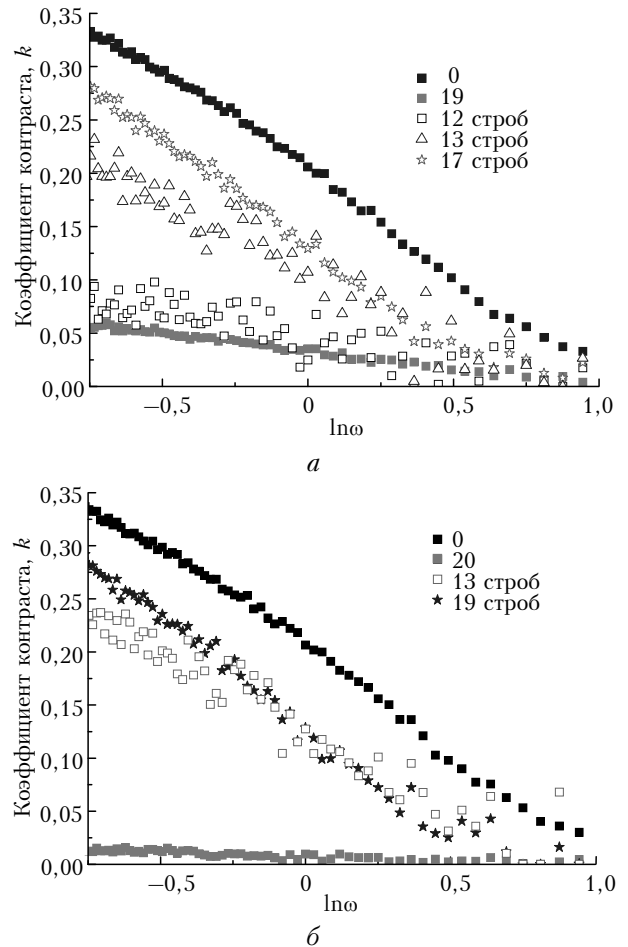


Рис. 4. Зависимость коэффициентов контраста от пространственной частоты, полученных для тумана (а) и дыма (б)

Для каждого значения коэффициента контраста k на рис. 4 рассчитывались СКО. Они возрастают с частотой, уменьшаются с увеличением текущего времени проведения экспериментов (т.е. с уменьшением оптической плотности среды). Выбросы значений k лежат в пределах СКО, абсолютные их значения варьируются в пределах от 0,05 до 0,1, возрастают с частотой и уменьшаются с оптической плотностью РП-сред.

В работе [3] оценено влияние длительности идеальной (прямоугольной формы) стробирующего импульса на контраст изображения объекта, формируемого идеальной ОЭС. На рис. 5 приведены результаты оценки влияния длительности лазерного импульса подсветки (что эквивалентно влиянию длительности строб-импульса) на фрагменты ЧКХ,

измеренных в обсуждаемых экспериментах. Длительности принимали значения 40, 90 и 120 нс.

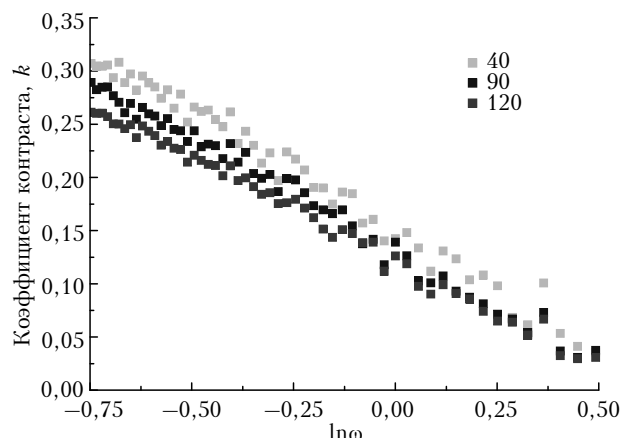


Рис. 5. Влияние длительности импульса подсветки на значение коэффициента контраста для дымовой среды

Из рис. 5 однозначно следует, что увеличение длительности импульса подсветки (или строба) приводит к возрастанию регистрируемой приемной системой помехи обратного рассеяния и, следовательно, к ухудшению качества послынных изображений пространства предметов. Физически этот результат понятен и не требует детальных пояснений.

Представляет интерес сравнить качество изображений объектов, наблюдаемых при равных оптических плотностях разных сред. Этот вопрос на уровне оценки влияния типа среды (точнее, вытянутости индикатрис рассеяния) на нерассеянные световые потоки рассмотрен в работе [3]. В обсуждаемых здесь результатах экспериментов оптические плотности сред были близки в двух ситуациях. В первой оптическая протяженность трассы наблюдения в тумане составляла $\tau = 2,916$, в дымной среде $\tau = 2,973$. Вторая ситуация для сравнения возникла во время эксперимента в дыму в 15:00, когда $\tau = 1,878$, и в 18:00 в эксперименте в тумане, когда $\tau = 1,908$. Поскольку в первой ситуации ЧКХ характеризовались сильными статистическими выбросами, то было принято решение найти их аппроксимации по методу наименьших квадратов в физически обоснованных предположениях, что эти функции должны быть гладкими и монотонно убывающими с ростом частоты ω . Найденные аппроксимации имеют вид

$$k = -A \ln \omega + B. \quad (12)$$

Значения коэффициентов A и B приведены в табл. 1.

Таблица 1
Значения констант аппроксимаций (12) в экспериментах с туманом и дымом

Среда	Время проведения эксперимента, ч	A	B
Туман	13:00	0,14076	0,129053
Туман	18:00	0,19291	0,134878
Дым	13:00	0,13182	0,109188
Дым	15:00	0,18741	0,145283

Результаты аппроксимации представлены на рис. 6. Они позволяют с определенной уверенностью сделать следующий вывод. При оптических толщинах $\tau \geq 2,9$ фрагмент ЧКХ (туман) $>$ ЧКХ (дым), а так как разность между ними возрастает с уменьшением пространственной частоты, то можно предполагать, что это неравенство распространяется и на ЧКХ в целом.

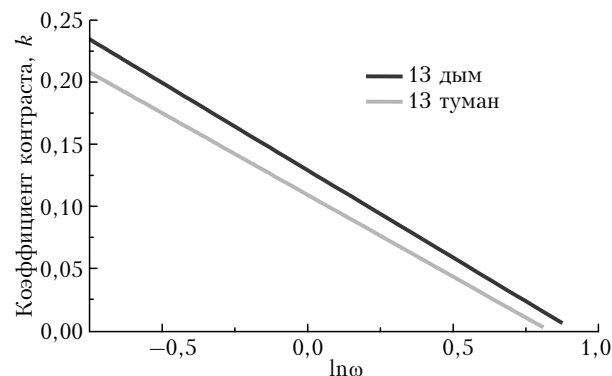


Рис. 6. Аппроксимации фрагментов ЧКХ, полученных для тумана и дыма при $\tau \approx 2,9$

С уменьшением оптической плотности сред, при $\tau = 1,878$ для тумана и $\tau = 1,908$ для дыма, это неравенство приближается к равенству. Следовательно, оптическая протяженность трассы наблюдения влияет на качество изображения объектов, но не является единственной характеристикой среды, его определяющей. Действительно, в процессе экспериментов по мере уменьшения оптической плотности сред изменялись средние размеры частиц (вытянутость индикатрис рассеяния), рассеивающие и поглощающие характеристики сред. В табл. 2 приведены их значения, восстановленные на основе решения обратных задач спектрофелометрических измерений [9, 10].

Таблица 2

Оптические и микрофизические характеристики модельных сред в экспериментах при близких значениях τ

Среда	Текущее время измерений, ч	$\beta_{ext}, \text{км}^{-1}$	$\beta_{abs}, \text{км}^{-1}$	τ	Размеры частиц, нм
Туман	13:00	126,28	0,7324	2,951	533
	18:00	81,68	0,600	1,878	611
Дым	13:00	129,51	0,7900	2,973	598
	15:00	82,99	1,4200	1,908	570

Заключение

В результате экспериментальных исследований, выполненных в Большой аэрозольной камере ИОА СО РАН с двумя модельными средами (туман и дым), получены следующие результаты.

1. Экспериментально подтверждено, что для активно-импульсных ОЭС с селекцией помехи обратного рассеяния качество изображений объектов, экранированных мутными средами, может быть почти на порядок выше, чем в режиме работы с постоянно открытым приемником. Преимущество

этого режима ОЭС проявляется тем существеннее, чем больше размеры объектов.

2. На качество изображения объектов в системах видения с управляемым приемом влияют не только оптическая протяженность трассы наблюдения, но и средние размеры частиц и их рассеивающие и поглощающие свойства.

3. При оптической протяженности трассы $\tau \approx 3,0$ различия в ЧКХ системы видения выше для дыма по сравнению с туманом. Эти различия нивелируются с уменьшением τ , что можно объяснить физическими процессами, происходящими при увеличении прозрачности среды, например увеличении размеров частиц в результате их слипания, повышения поглощения (осаждения на их поверхности сажи).

4. Увеличение длительности импульса подсветки (так же как и длительности строб импульса, отмеченного в [3]) приводит к ухудшению качества изображения в системах видения с селекцией обратного рассеяния. В экспериментах получено, что увеличение длительности импульса в 3 раза приводит к уменьшению значений ЧКХ в 1,3 раза.

Авторы благодарят инженера В.П. Протасову за помощь в оформлении статьи.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (гранты № 16-31-00033-мол_а, 15-01-00783-а, 15-05-01983-а).

1. *Wolf W.L.* The Infrared System. Design Process // *Photon. Spectra*. 2001. N 3. P. 191–202.
2. *Патент* EP 0 468 175 A2, 29.01.92.
3. *Belov V.V.* Statistical modeling of imaging process in active night vision systems with gate-light detection // *Appl. Phys. B*. 2002. V. 75, N 4–5. P. 571–576.

4. *Белов В.В., Матвиенко Г.Г., Пак Р.Ю., Шиянов Д.В., Куртиченко Р.Ю., Курачий М.И., Пустынский И.Н., Шурыгин Ю.А.* Активные ТВ-системы видения с селекцией фонов рассеяния // *Датчики и системы*. 2012. № 3. С. 25–30.
5. *Волков В.Г.* Методы модернизации активно-импульсных приборов ночного видения // *Приборостроение. Электротехника. Радиотехника. Электроника*. 2011. № 4. С. 60–63.
6. *Andersen J.F., Busck J., Heiselberg H.* Long distance high accuracy 3-D laser radar and person identification // *Proc. SPIE*. 2005. V. 5791. P. 9–16. DOI: 10.1117/12.604345.
7. *Ofer D., Norman S.K., Boaz W.* Range gated active night vision system for automobiles // *Appl. Opt.* 2006. V. 45, N 28. P. 7248–7254.
8. *Busck J.* Underwater 3-D optical imaging with a gated-viewing laser radar // *Opt. Eng.* 2005. V. 44, N 11. P. 116001-1–116001-7. DOI: 10.1117/1.2127895.
9. *Рахимов Р.Ф., Козлов В.С., Шмаргунов В.П.* О временной динамике комплексного показателя преломления и микроструктуры частиц по данным спектрофелометрических измерений в смешанных дымах // *Оптика атмосф. и океана*. 2011. Т. 24, № 10. С. 887–897; *Rakhimov R.F., Kozlov V.S., Shmargunov V.P.* On time dynamics of the complex refractive index and particle microstructure according to data of spectronephelometer measurements in mixed-composition smokes // *Atmos. Ocean. Opt.* 2012. V. 25, N 1. P. 51–61.
10. *Рахимов Р.Ф., Козлов В.С., Тумаков А.Г., Шмаргунов В.П.* Оптические и микрофизические свойства пиролизного дыма по данным измерений 4-волновым поляризационным спектрофелометром // *Оптика атмосф. и океана*. 2013. Т. 26, № 12. С. 1045–1053.
11. *Бурдун Г.Д., Марков Б.Н.* Основы метрологии: Уч. пособие для вузов, изд. 3-е, переработанное. М.: Изд-во стандартов, 1985. 256 с.

V.V. Belov, V.N. Abramochkin, Yu.V. Gridnev, A.N. Kudryavtsev, V.S. Kozlov, R.F. Rakhimov, V.P. Shmargunov, M.V. Tarasenkova. **Experimental study of the influence of optical characteristics of a medium on the imaging quality of vision OES with selection of backscattered noise signal.**

In the present work, results of experimental investigations into the influence of turbid media (fog, smoke) on the quality of image of objects observed through them using active pulsed OES operating in the modes with constantly open receiver and controllable receiver (in the mode of selection of backscattered noise signal) are considered. It is experimentally confirmed that in the active pulsed OES with selection of backscattered noise signal, the quality of images of objects screened by turbid media can be almost 10 times higher than in the case of their operation with constantly open receiver. The image quality of objects in systems of vision with controllable reception is influenced not only by the optical length of the observation path but also by such characteristics as the average sizes of particles and their scattering and absorbing properties.