

Влияние слоя дисперсной среды на характер изображений слабоинтенсивного объекта низкого контраста

Б.Д. Борисов*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 18.06.2008 г.

Рассматривается влияние фонов рассеяния вперед на изображения слабоинтенсивного объекта низкого контраста в импульсной системе видения с эффективной отсечкой помехи обратного рассеяния при наблюдениях через слой дисперсной среды различной оптической глубины.

Ключевые слова: изображение, счет фотонов, мутная среда, многократное рассеяние, контраст изображения.

Введение

Получение сведений о структуре слабосветящихся объектов той или иной природы представляется важной задачей, имеющей различные приложения. Разработка и создание активных приборов наблюдения с безопасным для глаз уровнем излучения могут существенно расширить диапазон использования оптических информационных систем для мониторинга окружающей среды [1, 2]. В ряде случаев исследования определенных типов объектов требуют ограниченных уровней плотности энергии оптического излучения (например, изучение естественной среды обитания живых существ в атмосфере и в водоемах в темное время суток без создания раздражающих и отвлекающих факторов). Достаточно часто информацию необходимо получать в сложных оптико-метеорологических условиях, в мутной среде или через ее слой при существенно ослабленном излучении от объекта наблюдения.

Решение подобного круга задач возможно с привлечением многоканальных квантовых счетчиков в качестве детекторов оптического излучения. Техника счета фотонов для систем построения изображения слабых источников наиболее хорошо развита в астрономии [3]. Оптико-электронные информационные системы, к которым относятся системы видения активного и пассивного типа, работающие в атмосфере или другой неоднородной рассеивающей среде, используют многоканальные счетчики фотонов. Но их использование для формирования изображений сопряжено с дополнительными трудностями, вызванными необходимостью оперативного накопления большого числа фотоотсчетов за короткое время.

В настоящей статье рассматривается система наблюдения с импульсной подсветкой объекта, в которой

используется хорошо известный метод пространственной селекции подавления помехи обратного рассеяния B от слоя среды. Это достигается посредством использования быстродействующего затвора, когда приемник держится закрытым до прихода отраженного от объекта импульса в плоскость приема [4].

Применительно к задачам наблюдения в атмосфере с помощью такого метода достаточно успешно можно бороться с этой помехой и фактически полностью ее устранить. Особенно эффективно применение метода пространственной селекции при наблюдении объектов через слоисто-неоднородные среды, когда рассеивающая неоднородность отделена некоторым пространственным промежутком от регистрируемого объекта. Такими средами могут быть, например, слой тумана, дыма, пыли и др., не вплотную прилегающие к объекту. Подобные ситуации часто складываются на приземных атмосферных трассах.

Одной из важных задач видения в атмосфере является наблюдение через плотные облачные слои. При этом наиболее изученная оптическая характеристика облаков — их оптическая толщина (глубина) τ [5]. Во всех этих случаях помеха обратного рассеяния для систем, работающих в темное время суток с достаточной короткими импульсами подсветки, полностью устраняется и $B = 0$. В таких условиях объект наблюдения можно рассматривать как самосветящийся с распределением яркости, соответствующим распределению коэффициентов отражения на объекте. На формирование изображения самосветящихся объектов основное влияние оказывает наиболее трудно устранимая помеха рассеяния вперед.

В статье не рассматриваются соотношения, позволяющие найти баланс между качеством изображения, числом необходимых фотоотсчетов и мощностью подсветки при наблюдении через рассеивающие слои. Основным критерием оценки качества изучаемых изображений выбран контраст, определяемый

* Борис Дмитриевич Борисов (borisov@iao.ru).

между элементами секций тест-объекта, а также между элементами и фонами, созданными рассеянием вперед.

Как известно, контрасты между элементами ограниченного объекта на фоне поглощающей подложки отличаются от контрастов бесконечно протяженной диффузно светящейся миры на идентичных пространственных частотах. Это связано с отсутствием подсветки от периферийных участков в ограниченном объекте. Тем не менее при определенных условиях характер модуляции тонкой структуры малоразмерного объекта отображается адекватно [6].

Основное внимание в статье сосредоточено на экспериментальном изучении изменения качества изображений, сформированных излучением от слабоинтенсивного тест-объекта низкого контраста. Качество изображений меняется под воздействием помех рассеяния вперед при вариациях оптической глубины слоя дисперсной среды с оптическими характеристиками, подобными облачной среде.

Аппаратура и методика эксперимента

Общая схема построения эксперимента приведена на рис. 1. Плоский диффузно отражающий тест-объект в виде двух секторов радиальной миры, которые разделены промежутком между их остриями, располагался на абсолютно поглощающей под-

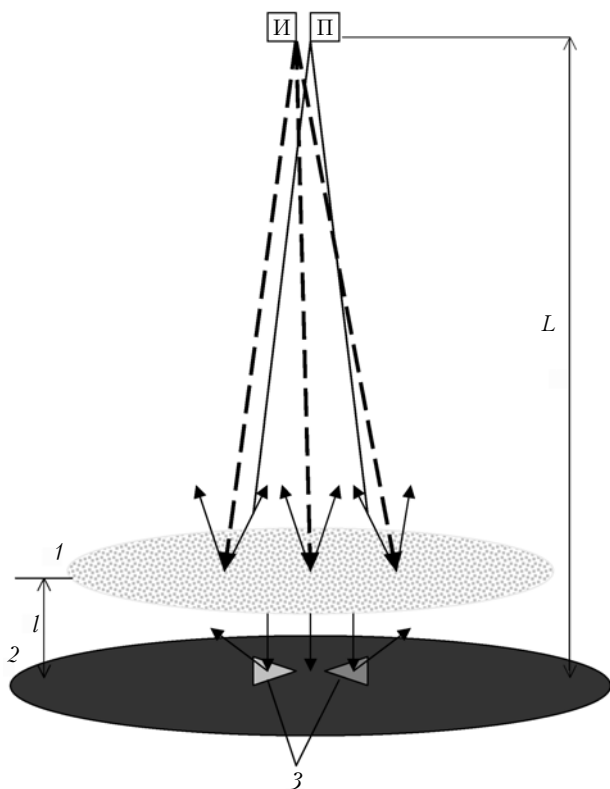


Рис. 1. Общая схема построения эксперимента: И — импульсный источник подсветки объекта; П — приемная система построения изображения с отсечкой помехи обратного рассеяния; 1 — слой дисперсной среды; 2 — подложка; 3 — объект наблюдения

ложке. Над тест-объектом на расстоянии l находился тонкий слой рассеивающей среды, через который велось наблюдение при помощи активной системы видения, использующей импульсную подсветку с отсечкой помехи обратного рассеяния и удаленной от объекта на дистанцию L . Между секциями тест-объекта задавался малый уровень контраста. На измерительной трассе слой дисперсной среды располагался относительно тест-объекта в области его наибольшего влияния на изображение, т.е. когда функция размытия точки формировалась в основном рассеянным вперед излучением [7].

Моделирование подобной схемы наблюдения осуществлялось на экспериментальной установке, блок-схема которой приведена на рис. 2.

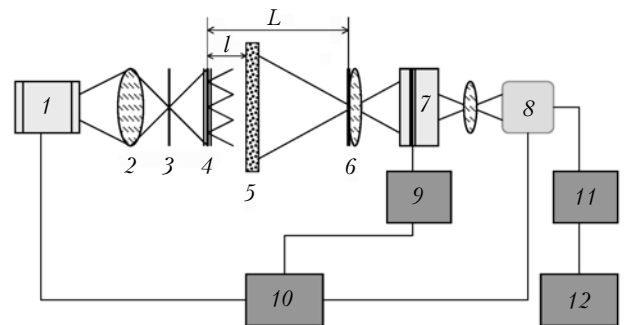


Рис. 2. Блок-схема экспериментальной установки: 1 — полупроводниковый импульсный лазер; 2 — фокусирующая линза; 3 — линейный ослабитель; 4 — пластина из молочного стекла с наложенным тест-объектом и фильтрами контраста; 5 — кювета с дисперсной средой; 6 — приемный объектив с отсекающим инфракрасным фильтром; 7 — электронно-оптический преобразователь; 8 — ПЗС-камера с оптикой переноса изображения; 9 — генератор стробирующего импульса питания микроканальной пластины; 10 — блок регулируемой задержки; 11 — видеоконтрольное устройство; 12 — компьютер

При этом предполагалось, что $B = 0$ и эквивалент диффузно отражающему тест-объекту создавался диффузно излучающим с заданием соответствующего контраста между элементами объекта. Таким образом, сохранив все параметры схемы регистрации с применением метода пространственной селекции, можно изучать влияние внешних и некоторых внутренних искажающих факторов систем видения заданного типа на качество изображений. Причем в процессе экспериментального моделирования устанавливался такой уровень интенсивности излучения тест-объекта, при котором освещенность в изображении выходила на пороговые значения и приемная система работала в режиме счета фотонов.

В экспериментах источником излучения служил импульсный полупроводниковый лазер с полосой излучения 0,89–0,93 мкм. Длительность импульса лазерного излучателя на уровне полуширины равна ~ 150 нс. С помощью линзы излучение лазера фокусировалось в плоскости регулируемого линейного ослабителя (рис. 2). Ослабленное излучение направлялось на стеклянную молочную пластину с наложенным на нее тест-объектом. Различия в интенсивностях излучения между соответствующими секциями

тест-объекта создавалось установкой перед ними нейтральных светофильтров. Прямоугольная кювета с дисперсной средой и рабочим объемом 128×95×10 мм размещалась на расстоянии $l = 24$ мм от тест-объекта до передней кромки рассеивающего слоя. Полная трасса L между наблюдаемым объектом и приемным объективом составляла 3250 мм.

Приемная часть экспериментальной установки состояла из объектива с установленным перед ним инфракрасным фильтром, отсекающим видимую область спектра. Изображение тест-объекта формировалось на фотокатоде электронно-оптического преобразователя (ЭОП) с импульсным питанием микроканальной пластины, которая выполняла роль быстродействующего оптико-электронного затвора. Благодаря высокому коэффициенту усиления светового потока, создаваемому высоковольтными импульсами, удавалось фиксировать одноэлектронные события. Сцинтилляции с экрана усилителя яркости считывались ПЗС-камерой, сигнал с которой передавался на персональный компьютер.

В целом измерительный тракт работал следующим образом. Кадровый синхроимпульс ПЗС-камеры одновременно с запуском лазера через регулирующую задержку запускал генератор строб-импульса питания микроканальной пластины ЭОП. С помощью задержки строб-импульс мог устанавливаться относительно лазерного импульса в любом временном участке. Схема задержки построена таким образом, что в течение одного телевизионного кадра затвор ЭОП открывается только один раз.

В качестве рассеивающей среды использовался обычный раствор молока в воде. Жировые шарики молока имеют правильную сферическую форму и находятся во взвешенном состоянии в водных растворах, создавая устойчивую дисперсную эмульсионную систему. Диаметр шариков колеблется от 0,25 до 20 мкм. Количество крупных жировых шариков диаметром 15–20 мкм незначительно. В основном их диаметр равен 1–4 мкм. Каждый жировой шарик имеет собственную белково-липидную оболочку, которая представляет собой поверхностный адсорбционный слой, возникающий под действием сил поверхностного натяжения. Благодаря оболочкам каждый шарик сохраняет обособленность [8]. Кроме того, такая рассеивающая среда является слабо поглощающей с вероятностью выживания фотона (отношению коэффициента рассеяния к коэффициенту ослабления) $\Lambda \geq 0,95 \div 0,99$ [9].

Поскольку принимаемый сигнал в одном телевизионном кадре состоял из набора случайным образом расположенных сцинтилляций на внутреннем шумовом фоне ПЗС-камеры, то возникала необходимость проведения соответствующей фильтрации для выделения полезного сигнала. В качестве параметров фильтрации применялись уровни среза интенсивности и пространственные размеры сцинтилляций соответствующих фотоотсчетов. Сцинтилляции учитывались, если ее размер был не менее заданного в программе. Обработанный по данной процедуре телевизионный кадр заносился в память компьютера с равными для всех фотоотсчетов заранее установ-

ленными пространственными размерами. В результате конечное изображение, очищенное от внутренних шумов ПЗС-камеры, определялось только количеством и распределением фотоотсчетов заданных размеров по полю кадра.

Для корректного построения изображений была дополнительно проведена калибровка всей системы в целом (включая и программу обработки) с целью определения ее линейности от поступающих на приемник интенсивностей.

Измерения проводились в следующем порядке. Задавались интенсивность излучения, обеспечивающая линейный режим работы системы, и контраст тест-объекта на уровне 0,18 при нулевой оптической толщине (кювета заполнена водой). При заданных параметрах проводилась запись видеосигнала с длиной реализации в 1799 телевизионных кадров. В дальнейшем менялась оптическая глубина и запись повторялась. Максимальная оптическая толщина, реализованная в эксперименте, составляла 13. В ходе обработки определялись средние числа фотоотсчетов в светлой и темной секциях изображения тест-объекта, а также в области фона. Средние числа фотоотсчетов находились в зоне, очерченной размерами зондирующих апертур, определяющих размер разрешаемых элементов на объекте. При обработке использовались зондирующие апертуры двух угловых размеров 1,1×2,5 и 2,5×4,1 мрад.

Обозначим среднее число фотоотсчетов светлой части изображения тест-объекта или фона N_1 , а более темной N_2 . Значения N_1 и N_2 , найденные из области, ограниченной изображением тест-объекта, целесообразно рассматривать как сигнал относительно фона рассеяния. За основной критерий, характеризующий качество изображения, выберем контраст, определяемый выражением

$$K = (N_1 - N_2) / (N_1 + N_2).$$

Результаты и обсуждение

На рис. 3, *a* приведен график изменения контраста между изображениями секций тест-объекта в зависимости от увеличивающейся оптической глубины слоя. Следует заметить, что представляемая зависимость и все нижеприведенные данные найдены путем усреднения восьми независимых циклов измерений, причем значения τ в реализациях подбирались строго одни и те же.

Из рис. 3, *a* видно, что контраст между элементами изображения тест-объекта с установленными зондирующими апертурами 2,5×4,1 мрад с ростом τ изменяется немонотонно и имеет максимум. Здесь можно выделить две характерные области изменения контраста с разными степенями его роста и уменьшения. Причину такой закономерности, по-видимому, нужно искать в специфике фонов рассеянного вперед излучения.

Рис. 3, *б* демонстрирует зависимость средних значений N_1 и N_2 от оптической толщины, найденных для фонов в приграничных областях изображений тест-объекта соответственно вблизи светлого и темного его

элементов. Видно, что при вариации τ интенсивности фонов рассеянного вперед излучения изменяются также немонотонно и проходят через максимум.

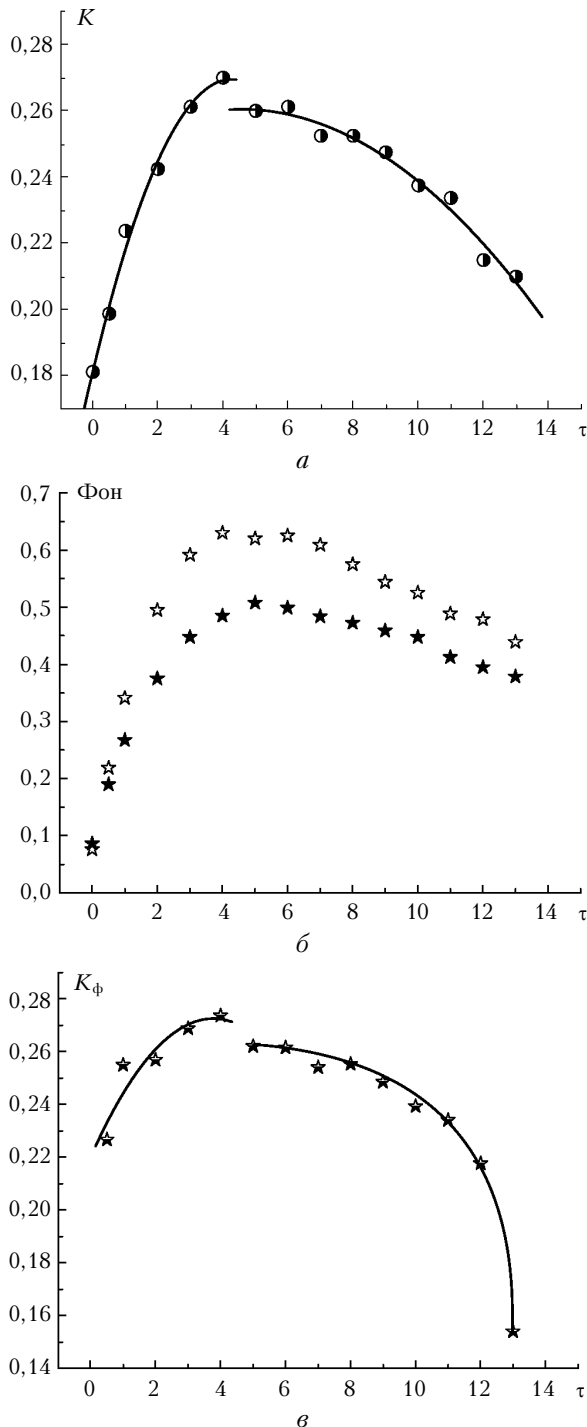


Рис. 3. Зависимости соотношений для средних чисел фотоотсчетов N_1 и N_2 от оптической глубины рассеивающего слоя: *a* — контраст между изображениями светлой и темной секций тест-объекта; *б* — N_1 и N_2 , измеренные в области фонов вблизи изображений секций тест-объекта (светлая — поля звездочка, темная — заполненная звездочка); *в* — контраст между найденными фонами на изображениях светлой и темной секций. Зондирующие апертуры во всех измерениях $2,5 \times 4,1$ мрад

Богатый фактический материал по фонам рассеянного вперед излучения приведен в работе [9]. Данные получены на основе измерений фонов многократного рассеяния с использованием узких лазерных пучков. В [9] показано, что в сечении пучков яркости многократно рассеянного вперед излучения при вариации оптической толщи изменяются немонотонно. Анализ решения уравнения переноса в двухпоточковом приближении для интенсивностей рассеянного вперед и назад оптического излучения от τ (в том числе и в присутствии поглощения) проведен в работе [10]. В частности, в отсутствие отражения от среды при интенсивности падающего потока I_0 интенсивность рассеянного вперед излучения принимает вид

$$I_n = I_0[(\tau)^n/n!] \exp(-\tau),$$

где $n = 0, 1, 2, 3, \dots$ характеризует кратность рассеянного излучения. Из этого выражения следует, что в зависимости $I_n(\tau)$ существует максимум в области $\tau_{\max} = n_{\text{эф}}$. Таким образом, наличие максимума в фоне, созданном рассеянным вперед излучением, может быть объяснено существованием эффективных кратностей рассеяния, при которых интенсивность рассеянного излучения становится максимальной для рассматриваемых среды и направления. В рассматриваемых экспериментальных данных эффективная кратность рассеяния, по всей видимости, находилась в области $n \approx 5$.

В том, что фон рассеяния вперед играет определяющую роль в формировании контраста в изображении, можно убедиться, построив его значение для фоновой части изображения, используя значения N_1 и N_2 (см. рис. 3, б). Анализ этих данных позволил сделать вывод, что характер изменения контраста при вариации τ схож с закономерностью, показанной на рис. 3, а.

Как известно, уменьшение яркости источника при переносе его излучения через слой достаточно плотной дисперсной среды происходит в результате экспоненциального ослабления с аддитивной добавкой яркости, возникающей в результате эффектов многократного рассеяния в направлении проходящего излучения. Ввиду этого регистрируемая энергетическая освещенность для элемента изображения может быть записана в виде

$$N_{\text{рег}} = N_0 \exp(-\tau) + N_{\text{ф}},$$

где N_0 — интенсивность на элементе изображения тест-объекта, зарегистрированная системой без ввода рассеивающих частиц в кювету с водой; $N_{\text{ф}}$ — интенсивность, созданная рассеянным вперед излучением на этом же элементе.

Воспользовавшись этим соотношением, определим фоновую составляющую на элементах непосредственно тест-объекта, изъяв из $N_{\text{рег}}$ экспериментально найденную величину $N_0 \exp(-\tau)$, которая отделяет сигнал без фона рассеяния. Контраст $K_{\text{ф}}$ между фонами, найденными в результате применения такой процедуры, приведен на рис. 3, в.

Таким образом, изменения контраста изображения малоразмерного и малоконтрастного тест-объекта

с вариацией τ в данных условиях эксперимента полностью соответствуют характеру трансформации контраста между фонами рассеяния над светлым и темным элементами изображения тест-объекта.

Подобная закономерность в изменении величины контраста сохранялась и в том случае, когда контраст определялся между изображениями секций тест-объекта с более высоким разрешением (зондирующие апертуры имели угловые размеры $1,1 \times 2,5$ мрад).

Вернувшись к рис. 3, а, вариации контраста от оптической толщи можно прокомментировать следующим образом. Первый участок кривой, для которого с ростом τ контраст растет, определяется малыми кратностями рассеяния, когда фоновая составляющая входит в зону формирования изображения тест-объекта с минимальным размытием его краев. Дальнейшее увеличение оптической толщи повышает кратность рассеяния, что приводит к рассеянию на большие углы, размытию краев и подавлению энергетической освещенности в изображении.

Наличие контраста фонов, при объективных оценках, позволяет судить о присутствии в структуре тест-объекта неоднородностей яркости, даже если изображение визуально воспринимается как однородное.

Следующий этап работы заключался в изучении контрастов между изображениями секций тест-объекта (сигнальной части изображения) и прилегающих к их боковым границам фонов рассеяния вперед, соответственно около светлой и темной их частей. При обработке использовались зондирующие апертуры с угловыми размерами $2,5 \times 4,1$ мрад. Такие характеристики важны в задачах, связанных с обнаружением (локацией) малоразмерного объекта при наблюдении через рассеивающий слой посредством активной системы видения.

Вид зависимости такого рода демонстрирует рис. 4, а. Анализ приведенных закономерностей показал, что регистрируемый контраст с увеличением оптической глубины спадает по экспоненте:

$$K = m \exp(-\tau/q),$$

где m и q — подгоночные параметры, при прочих равных условиях эксперимента зависящие от энергетической яркости элементов тест-объекта.

Конфигурация тест-объекта позволяла изучать зависимость контраста между элементами изображений и фонами рассеяния вперед, сосредоточенными между острями светлой и темной секций (средний фон). Для этих целей при обработке секции изображений тест-объекта разбивались на две равные зоны. При этом использовалась зондирующая апертура угловых размеров $1,1 \times 2,5$ мрад. Зависимости изменения контраста от τ строились между средним фоном и элементами (светлыми и темными) для соответствующих зон изображений.

В качестве примера на рис. 4, б приведены вариации контраста с ростом оптической глубины, найденные между средним фоном и темным элементом изображения, вписываемым в более широкий участок изображения секции тест-объекта.

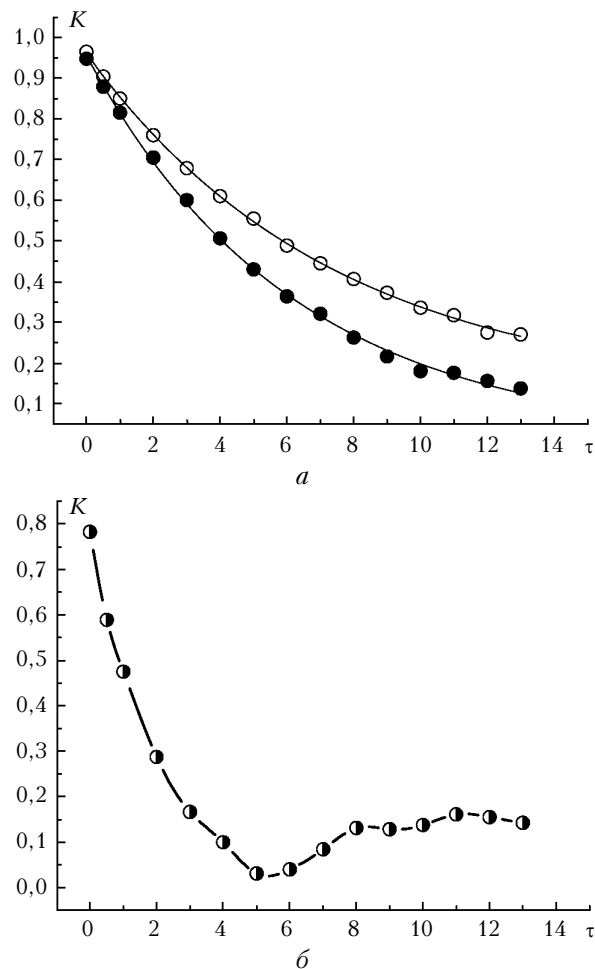


Рис. 4. Контраст между изображениями светлой (полый кружок) и темной (заполненный кружок) секций тест-объекта и прилегающими к их боковым границам фонами, зондирующие апертуры $2,5 \times 4,1$ мрад (а); контраст между средними фонами и изображениями темного элемента в зоне широкой части секции тест-объекта, зондирующие апертуры $1,1 \times 2,5$ мрад (б)

Видно, что контраст в изображениях такого типа испытывает инверсию. Первоначально контраст с увеличением τ понижается, достигает нулевого значения, а потом с ростом оптической толщи начинает возрастать. Такая закономерность вызвана перераспределением интенсивностей потоков излучений, созданных средним фоном и сигналом, отягощенным рассеянием вперед в зоне зондирующей апертуры на изображениях темного элемента тест-объекта. Уравнивание интенсивностей в рассматриваемом варианте, которое приводит к нулевому контрасту, наблюдается при $\tau \sim 5,0$.

Заключение

В данных условиях эксперимента зависимость контраста, определяемого между элементами в изображениях секций малокаонтрастного тест-объекта, от вариации оптической глубины слоя рассеивающей среды немонотонна. В области сравнительно не очень больших оптических толщ (до $\tau \sim 4$) контраст растет

по экспоненте и достигает максимума. С дальнейшим ростом τ контраст медленно убывает.

Установлено, что основной причиной возникновения такой закономерности являются фоны, возникающие в результате рассеяния излучения в направлении на приемник от светлого и темного элементов объекта.

Контрасты между элементами изображений тест-объекта и приграничными фонами спадают по экспоненте с ростом τ . Контраст имеет значимую величину вплоть до $\tau = 13$, реализованную в эксперименте.

В контрастах между средним фоном и темным элементом тест-объекта наблюдается инверсия контрастов для $\tau \geq 5$, которая вызвана перераспределением потоков излучения между фоном и сигналом с увеличением оптической толщи.

1. Бухарин А.В., Першин С.М. Теоретическое рассмотрение работы лидара обратного рассеяния с безопасным для глаза уровнем излучения // Оптика атмосфер. и океана. 1994. Т. 7. № 4. С. 521–537.
2. Першин С.М., Бухарин А.В., Линкин В.М., Макаров В.С. Калибровка аэрозольного лидара с квантовым

счетчиком и регистрация атмосферных неоднородностей // Оптика атмосфер. и океана. 1994. Т. 7. № 4. С. 538–547.

3. Эклз М., Сим Э., Триттон К. Детекторы слабого излучения в астрономии. М.: Мир, 1986. 200 с.
4. Ванюков М.П., Нилов Е.В., Чертков А.А. Наблюдение и фотографирование в светорассеивающих средах методом пространственной селекции // Опτικο-механ. пром. 1970. № 6. С. 50–55.
5. Грейсух В.М., Долин Л.С., Левин И.М. О видимости через облака // Оптика атмосфер. и океана. 1992. Т. 5. № 8. С. 829–834.
6. Долин Л.С., Левин И.М. Справочник по теории подводного видения. Л.: Гидрометеоздат, 1991. 229 с.
7. Будак В.П., Гуторов М.М., Федосов В.П. Зависимость качества изображения объекта от положения слоя повышенной мутности // Светотехника. 1986. № 11. С. 19–21.
8. Тиняков Г.Г., Тиняков В.Г. Микроструктура молока и молочных продуктов. М.: Пищевая промышленность, 1972. 255 с.
9. Зуев В.Е., Кабанов М.В. Перенос оптических сигналов в земной атмосфере (в условиях помех). М.: Сов. радио, 1977. 368 с.
10. Чекалинская Ю.И. О кратности рассеяния света // Изв. АН СССР. Сер. Физ. 1957. Т. 21. № 11. С. 1494–1499.

V.D. Borisov. Influence of the layer of a dispersed medium on the character of image of a low-intensity low-contrast object.

Influence of the contrast of forward-scattered background radiation on the image of a low-intensity low-contrast object formed by a pulsed vision system with efficient of backscattered cutoff background radiation is considered for observations through a layer of dispersed medium with different optical depths.