

В.В. Белов, А.В. Журавлев, С.Д. Пиитик

Оценка дальности обнаружения одиночных объектов и их выделения на фоновой поверхности при наблюдении через рассеивающие среды

Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию 14.02.2005 г.

Рассмотрены вопросы оценок предельных дальностей обнаружения одиночных объектов (в отсутствие фона) и их выделения из фонового окружения при наблюдении с помощью пассивных и активных оптико-электронных систем через рассеивающие и поглощающие среды. Предложены аналитические соотношения, применимые для любых оптических толщ среды при условии слабо развитых процессов рассеяния (малых значениях коэффициента рассеяния). Анализ этих соотношений показал, что использование оптической подсветки не гарантирует увеличения предельных дальностей обнаружения объектов при их наблюдении через мутные среды.

Эффективность применения оптико-электронных систем (ОЭС) обнаружения и распознавания объектов в реальных условиях их эксплуатации зависит от оптического состояния атмосферного (гидрологического или атмосферно-гидрологического) канала распространения оптического излучения от объекта к наблюдателю.

Такую зависимость можно достаточно просто учесть в случаях, когда этот канал в оптическом смысле слабо замутнен. Для этого достаточно контролировать только одну характеристику канала — его оптическую протяженность.

Если же канал замутнен, то, как правило, недостаточно учитывать интегральные или средние характеристики в канале (такие как оптическая протяженность или толщина τ , средний коэффициент поглощения β_{abs} и рассеяния β_{sct}). Оказывается, что в этих случаях необходимо знать распределения $\beta_{abs} = \beta_{abs}(l)$, $\beta_{sct} = \beta_{sct}(l)$ вдоль линии визирования, а также индикатрису рассеяния $g(\omega, \omega')$ (здесь ω и ω' — векторы направления распространения излучения до и после его взаимодействия с рассеивающим центром в среде).

Известны теоретические и экспериментальные работы [1–5], в которых показано, что при одной и той же оптической толщ рассеивающей среды и индикатрису рассеяния можно получать изображения, существенно различающиеся своим качеством. Поэтому при разработке методик расчета дальности обнаружения одиночных объектов (когда отсутствует окружающий его фон) и визуального или приборного выделения их из окружающего фона необходим учет этих внешних (по отношению к ОЭС) факторов.

Этим вопросам посвящено значительное число работ. Среди них можно отметить работу [1], в кото-

рой изложены результаты исследований влияния мутных сред на предельные дальности обнаружения и контрасты изображений наблюдаемых через них объектов для различных схем наблюдения. В основном эти результаты получены при решении уравнения переноса излучения в малоугловом или малоугловом диффузионном приближениях. Отдельно рассмотрен асимптотический режим формирования изображений при больших оптических толщинах сред, экранирующих объект от наблюдателя. Полученные в [1] выражения для предельных дальностей обнаружения учитывают не только рассеивающие и поглощающие свойства среды, но и характеристики приемника (угол поля зрения, площадь входного зрачка, уровень дробового шума) и источника подсветки (прежде всего угловая расходимость излучения).

В предлагаемой статье рассматриваются вопросы построения подобных оценок в предположении, что процесс поглощения в среде преобладает над процессом рассеяния. В этом случае можно получить простые аналитические соотношения, связывающие средний коэффициент ослабления в среде, пороговую энергетическую и контрастную чувствительность приемника с интенсивностью излучения (отражения), распространяющегося от объекта и его фонового окружения в направлении на приемник. Для активных систем наблюдения учтены отраженное от среды излучение и интенсивность подсветки объекта и фона.

Пассивное наблюдение объектов

Пусть объект — самосветящийся или освещен внешним источником некогерентного излучения. Предположим, что среда, экранирующая объект от

наблюдателя, характеризуется оптической протяженностью τ , обусловленной в основном процессом поглощения (т.е. $\beta_{abs} \gg \beta_{sct}$, или $\tau_{abs} \gg \tau_{sct}$, здесь τ_{abs} и τ_{sct} — оптические толщи слоя по поглощению и рассеянию соответственно). В этом случае искажение тонкой пространственной структуры изображения отсутствует или незначительно (см., например, [1, формулу (5.7)]). Тогда влияние среды сводится к уменьшению контраста изображения объекта, которое достаточно просто учесть, используя закон Бугера.

Пусть интенсивность излучения (отражения) объекта в направлении наблюдателя равна I_t , а фона в окрестности объекта — I_f . Тогда контраст изображения элементов объекта относительно фона в отсутствие среды

$$k_t = (I_t - I_f)/(I_t + I_f). \quad (1)$$

Ослабление оптического излучения в канале, соединяющем наблюдателя и объект, оценивается по закону Бугера как

$$I = I_0 \exp(-\tau). \quad (2)$$

Здесь I_0 — интенсивность падающего на слой среды светового потока.

Следовательно, появление рассеивающей среды малой оптической плотности (по рассеивающему процессу) не приведет к уменьшению коэффициента контраста объекта:

$$k_{t(s)} = \exp(-\tau)(I_t - I_f)/\exp(-\tau)(I_t + I_f) = k_t, \quad (3)$$

где $k_{t(s)}$ — коэффициент контраста относительно фона при наблюдении его через рассеивающую среду. Обратим внимание на то, что в данном случае мы не делали никаких ограничений на поглощающие свойства среды. То есть даже при больших оптических толщах (обусловленных в основном процессом поглощения) среда не оказывает влияния на качество изображения, если под ним понимать только контрастность изображения. В действительности увеличение поглощения в среде (при сохранении коэффициента рассеяния и его малости) приведет к снижению освещенности в плоскости изображения объекта при сохранении его контрастности и может существенно изменить его цветовой портрет.

Очевидно, что при заданной чувствительности приемника по энергетике входного сигнала можно указать такую оптическую толщину среды τ , при которой сигнал от объекта не будет обнаружен.

Поэтому для каналов переноса изображения, в которых процессы рассеяния играют несущественную роль, предельная дальность R_{lo} обнаружения одиночного объекта (отсутствует окружающий его фон) ограничивается только энергетической I_{ld} чувствительностью приемника. Предельная дальность R_{lr} , при которой объект можно выделить из окружающего его фона, определяется контрастной k_{ld} чувствительностью приемника. Исходя из этого, с учетом (1)–(3) можно записать:

$$R_{lo} = \ln (I_t/I_{ld})/\beta_{ext}, \quad (4)$$

$$R_{lr} = \ln [(I_t(1 - k_{ld}))/I_{ld}(1 + k_{ld})]/\beta_{ext}. \quad (5)$$

Здесь $\beta_{ext} = \beta_{abs} + \beta_{sct}$ — средний коэффициент ослабления в среде вдоль линии визирования.

Оценка (5) получена в предположении, что а) интенсивность, излучаемая (отраженная) объектом, выше, чем фоновая (если это не так, то достаточно переименовать объект в фон, а фон — в объект, поскольку, с точки зрения анализа изображения, безразлично, какую его область мы назовем объектом);

б) на предельных дальностях обнаружения интенсивности излучения I_t $I_f \rightarrow I_{ld}$, но $I_t > I_f$.

Несложно убедиться, что из (4), (5) вытекают следующие физически не противоречивые выводы:

— с ростом оптической плотности среды предельные дальности R_{lo} и R_{lr} уменьшаются;

— при $k_{ld} \rightarrow 0$ предельная дальность $R_{lr} \rightarrow R_{lo}$ и (5) переходит в (4);

— при $k_{ld} \rightarrow 1$ предельная дальность $R_{lr} \rightarrow 0$;

— при $\beta_{ext} \neq 0$ $R_{lr} < R_{lo}$, т.е. предельная дальность обнаружения больше предельной дальности выделения объекта из фона.

Схемы активного наблюдения объектов

Предположим, что наблюдение производится в условиях оптической (например, лазерной) подсветки. При этом по-прежнему предполагаем, что осуществляется некогерентный прием оптического излучения. Рассмотрим несколько основных вариантов подсветки.

1. Искусственная подсветка в схемах наблюдения (общие замечания)

Подсветка может осуществляться широким оптическим пучком (или узким, но сканирующим) таким образом, что формируется кадр изображения, содержащий как объект наблюдения, так и окружающий его фон, если он присутствует.

Так же как и выше, предположим, что интенсивность излучения (отражения) объекта в направлении наблюдателя равна I_t , а фона в его окрестности I_f . Тогда контраст k_t изображения элементов объекта или самого объекта относительно фона в отсутствие среды равен (1). Пусть в канале появляется среда, в которой процесс поглощения существенно подавляет процесс рассеяния, тогда

$$k_{t(s)} = \exp(-\tau) \times$$

$$\times (I_t - I_f)/[\exp(-\tau)(I_t + I_f) + 2I_d] \neq k_t, \quad (6)$$

где I_d — помеха обратного рассеяния (при импульсной подсветке) или световая дымка (при стационарном излучении источника).

Таким образом, в отличие от пассивного наблюдения появление рассеивающей среды между наблюдателем и объектом приводит к уменьшению

контраста изображения и тем более сильному, чем интенсивнее помеха обратного рассеяния или световая дымка.

Под помехой обратного рассеяния понимают отраженное от среды излучение при импульсной подсветке объекта. Свойства этой помехи достаточно хорошо изучены и описаны, например в [3, 6].

Ниже ограничимся рассмотрением более простого случая стационарной подсветки, когда $I_d(t) = I_d$. Зависимость I_d от свойств среды можно также найти в работах [3, 6].

2. Подсветка объекта

Пусть лазерный луч подсвечивает *только объект* наблюдения, но не окружающий его фон. Далее, при записи соотношений будем использовать нижние индексы, при этом индексы t и f указывают на объект или фон соответственно, а индексы в скобках указывают на то, что между наблюдателем и целью существует среда (индекс s) и есть лазерная подсветка (индекс l).

Пусть среда отсутствует. Тогда, очевидно, для интенсивностей можем записать:

$$I_{t(l)} = I_t + \Delta I_{t(l)}, \quad I_{f(l)} = I_f, \quad (7)$$

а для коэффициента контраста

$$k_{t(l)} = (I_t + \Delta I_{t(l)} - I_f) / (I_t + \Delta I_{t(l)} + I_f). \quad (8)$$

Сравнивая (8) с коэффициентом контраста k_t (3) в отсутствие лазерной подсветки, получим очевидный результат, что использование лазерной подсветки в этом варианте ее использования приводит к повышению контраста объекта:

$$k_{t(l)} - k_t = 2I_t \Delta I_{t(l)} I_f / [(I_t + I_f)(I_t + I_t \Delta I_{t(l)} + I_f)] > 0.$$

Пусть между объектом и наблюдателем появляется рассеивающая и поглощающая среда, не приводящая к разрушению тонкой пространственной структуры в изображении объекта, т.е. мутная среда, в которой преобладает процесс поглощения.

Рассмотрим два возможных варианта влияния I_d на изображение сцены объект/фон.

а) Индикатриса рассеяния $g(\omega, \omega')$ и геометрические параметры схемы наблюдения таковы, что отраженное излучение на изображении концентрируется в пределах объекта и не влияет на изображение фона, т.е.

$$I_{t(s,l)} = I_{t(s)} + \Delta I_{t(l)} + I_d, \quad I_{f(s,l)} = I_{f(s)}. \quad (9)$$

Запишем коэффициент контраста изображения для этого случая. Он, очевидно, будет равен:

$$k_{t(s,l)} = [(I_{t(s)} + \Delta I_{t(l)}) \exp(-\tau) + I_d - I_{f(s)} \exp(-\tau)] \times \\ \times [(I_{t(s)} + \Delta I_{t(l)}) \exp(-\tau) + I_d + I_{f(s)} \exp(-\tau)]^{-1}. \quad (10)$$

Можно показать, что

$$k_{t(l)} - k_{t(s,l)} < 0,$$

т.е. при появлении рассеивающей среды коэффициент контраста изображения объекта может стать выше, по сравнению со случаем, когда этой среды между ними не было. Это возможно, когда отраженное средой излучение лазерной подсветки аддитивно усиливает сигнал от объекта (при некогерентном приеме это так). При этом мы предполагаем, что изображение световой дымки не выходит за границы изображения объекта и однородно в его пределах. Последнее возможно, если рассеивающая среда однородна в плоскостях, перпендикулярных направлению распространения лазерного пучка.

Итак, оценка R_{lo} в этом случае примет вид

$$R_{lo} = \ln [(I_{ld} + \Delta I_{t(l)}) / (I_{ld} - I_d)] / \beta_{ext}, \quad (11)$$

а предельная дальность выделения объекта (или его элементов) из фонового окружения:

$$R_{lr} = \ln \{ (I_{t(s)} + \Delta I_{t(l)}) (1 - k_{ld}) \times \\ \times [I_{ld} (1 + k_{ld}) - I_d (1 - k_{ld})]^{-1} \} / \beta_{ext}. \quad (12)$$

б) Пусть условия «а» не выполняются и

$$I_{t(s,l)} = I_{t(s)} + \Delta I_{t(l)} + I_d, \quad I_{f(s,l)} = I_{f(s)} + I_d. \quad (13)$$

В этом случае

$$k_{t(s,l)} = \exp(-\tau) (I_{t(s)} + \Delta I_{t(l)} - I_{f(s)}) \times \\ \times [(I_{t(s)} + \Delta I_{t(l)} + I_{f(s)}) \exp(-\tau) + 2I_d]^{-1}. \quad (14)$$

Тогда

$$k_{t(l)} - k_{t(s,l)} = 4I_d \Delta I_{t(l)} \exp(-\tau) / [\exp(-2\tau) \times \\ \times (I_{t(s)} + \Delta I_{t(l)} + I_{f(s)})(I_{t(s)} + \Delta I_{t(l)} + I_{f(s)}) + 2I_d] > 0,$$

т.е. появление рассеивающей среды в этом случае приводит к уменьшению коэффициента контраста изображения объекта.

Предельная дальность R_{lo} обнаружения одиночного объекта (в отсутствие фона) оценивается в этом случае, очевидно, по соотношению (11), а предельная дальность

$$R_{lr} = \ln \{ (I_{t(s)} + \Delta I_{t(l)}) \times \\ \times (1 - k_{ld}) \} / [I_{ld} (1 + k_{ld}) - 2k_{ld} I_d] / \beta_{ext}. \quad (15)$$

3. Подсветка объекта и фона

Пусть стационарный искусственный источник оптического излучения подсвечивает одновременно объект и окружающий его фон и создает световую дымку I_d . Тогда интенсивность излучения в направлении приемника, отраженного от объекта и фона, запишем в виде

$$I_{t(s,l)} = I_{t(s)} + \Delta I_{t(l)} + I_d, \\ I_{f(s,l)} = I_{f(s)} + \Delta I_{f(l)} + I_d. \quad (16)$$

Очевидно, что предельную дальность обнаружения одиночного объекта можно оценить, используя (11). Несложно получить и оценку предельной дальности выделения объекта из фонового его окружения:

$$R_{lr} = \ln \{[(1 - k_{ld})(I_{t(s)} + \Delta I_{t(l)}) - (1 + k_{ld})\Delta I_{r(l)}] \times \\ \times [(1 + k_{ld})I_{ld} + 2k_{ld}I_d]^{-1}\} / \beta_{ext}. \quad (17)$$

Сравним предельные дальности R_{lo} для пассивной (4) (обозначим ее ${}^{(4)}R_{lo}$) и активной (11) (обозначим ее ${}^{(11)}R_{lo}$) схем наблюдения. Для этого рассмотрим разность между ними:

$${}^{(4)}R_{lo} - {}^{(11)}R_{lo} = \ln(I_t/I_{ld})/\beta_{ext} - \\ - \ln[(I_{ld} + \Delta I_{t(l)})/(I_{ld} - I_d)]/\beta_{ext}. \quad (18)$$

Умножая (18) на β_{ext} , получим

$${}^{(4)}\tau_{lo} - {}^{(11)}\tau_{lo} = \ln\{I_{t(s)}(I_{ld} - I_d)/[I_{ld}(I_{ld} + \Delta I_{t(l)})]\}, \quad (19)$$

где ${}^{(4)}\tau_{lo}$ и ${}^{(11)}\tau_{lo}$ — оптическая протяженность расстояний ${}^{(4)}R_{lo}$ и ${}^{(11)}R_{lo}$ соответственно.

Разность (19) может быть как положительной, так и отрицательной в зависимости от характеристик оптического приемника (I_{ld}), источника подсветки и свойств среды ($\Delta I_{t(l)}$), а также излучательных или отражательных характеристик объекта ($I_{t(s)}$). То есть использование подсветки не только не приводит к увеличению предельной дальности обнаружения одиночного объекта, но может и уменьшить ее. Основной причиной этого является световая дымка или помеха бокового подсвета. Для исключения ее влияния на эффективность работы систем приборного видения используют импульсную подсветку и стробирование (или управление) работой приемника [7].

Сравнивая (5) и (12), приходим к выводу, что использование подсветки увеличивает предельную дальность, на которой можно выделить объект из окружающего его фона. Однако при этом должны быть выполнены условия, при которых изображение световой дымки концентрируется в пределах изображения объекта (или его элементов). Если это не выполняется, то использование подсветки (при определенных условиях) может привести к ухуд-

шению эффективности работы оптико-электронной системы. К аналогичному результату приводит и одновременный подсвет объекта и фона.

Таким образом, для сред любой оптической толщины τ (характеризуемых невысокими значениями коэффициента рассеяния, такими, что их оптическая толщина по рассеянию $\tau_{sc} \ll 1$) выражения (4), (5) могут быть рекомендованы для оценки дальности обнаружения и выделения объектов на фоновом окружении в пассивных схемах наблюдения. Оценку этих параметров для активных схем наблюдения можно осуществить, используя (11), (12) или (11), (15) (в зависимости от индикатрисы рассеяния) при подсветке только объекта, а (11) и (17) — при подсветке всей сцены, включающей в себя объект и окружающий его фон.

Авторы благодарят д.ф.-м.н. В.В. Веретенникова за полезные критические замечания при рецензировании работы.

1. Зега Э.П., Иванов А.П., Кацев И.Л. Перенос изображения в рассеивающей среде. Минск: Наука и техника, 1985. 327 с.
2. Браво-Животовский Д.М., Лучинин А.Г., Савельев В.А. Некоторые вопросы теории видения в мутных средах // Изв. АН СССР. Физ. атмосф. и океана. 1969. Т. 5. № 7. С. 672–684
3. Зуев В.Е., Белов В.В., Веретенников В.В. Теория систем в оптике дисперсных сред. Томск: Изд-во «Спектр» ИОА СО РАН, 1997. 402 с.
4. Бабак Э.В., Беляев А.С., Гитин Ю.Л. Влияние удаленности слоя дисперсной системы от приемника на измеряемую оптическую передаточную функцию // Оптика и спектроскопия. 1981. Т. 51. Вып. 2. С. 349–352.
5. Будаков В.П., Гуторов М.М., Федосов В.П. Зависимость качества изображения объекта от положения слоя повышенной мутности // Светотехника. 1986. № 11. С. 19–21.
6. Иванов А.П. Оптика рассеивающих сред. Минск: Наука и техника, 1969. 592 с.
7. Belov V.V. Statistical modeling of imaging process in active night vision systems with gate-light detection // Appl. Phys. 2002. V. 75. N 4–5. P. 571–576.

V.V. Belov, A.V. Zhuravlev, S.D. Piitik. Estimation of detection range of single objects and their separation against the background surface when observing through scattering media.

This paper considers the estimation of the limiting ranges for detection of single objects (in the absence of the background) and the separation of such objects against the background surface when they are observed by passive or active opto-electronic systems through scattering and absorbing media. Analytical equations are proposed, which can be used at any optical depth of the medium under the conditions of weakly developed scattering processes (low scattering coefficients). The analysis of these equations has shown that the use of optical illumination does not guarantee the increase of the limiting detection ranges for objects observed through turbid media.