

Е.М. Афанасьева, В.А. Понькин

СОВМЕСТНАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ОПТИЧЕСКОЙ ПЕРЕДАТОЧНОЙ ФУНКЦИИ АТМОСФЕРЫ И ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБНАРУЖЕНИЯ ПРОТЯЖЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

На основе теории обнаружения пространственно-протяженных объектов с использованием аппарата оптических передаточных функций проведена количественная оценка совместного влияния оптической передаточной функции (ОПФ) атмосферы и оптической системы на характеристики обнаружения протяженных объектов. Оценки проведены для ОПФ атмосферы, полученной в рамках малоуглового приближения.

Показано, что при определении характеристик обнаружения малоразмерных (100–200 м) объектов в горизонтальной однородной рассеивающей атмосфере следует учитывать ОПФ только оптической системы, а пространственно-частотные характеристики атмосферы можно не учитывать. При обнаружении в этих же условиях объектов с линейными размерами порядка 500 м, добавка, обусловленная рассеянным излучением, приводит к изменению характеристик обнаружения на 20% и более, а влиянием на характеристики обнаружения ОПФ оптической системы можно пренебречь.

Известно [1], что на обнаружение (распознавание) удаленных объектов оказывает влияние среда распространения сигналов, характеристики оптико-электронных средств (ОЭС) и самого наблюдаемого объекта.

Современный подход к оценке этого влияния основан на теории линейной фильтрации. К настоящему времени достаточно детально рассмотрены оптические передаточные функции (ОПФ) ОЭС, рассеивающих и турбулентных сред [1, 2]. Однако совместное влияние ОПФ атмосферы и ОЭС на характеристики обнаружения протяженных объектов изучено недостаточно. Это не позволяет оценить необходимую степень учета ОПФ атмосферы, оптической системы и объектов наблюдения при математическом моделировании процессов обнаружения удаленных объектов в интересах решения разнообразных практических задач.

В настоящей статье на основе полученных количественных оценок совместного влияния ОПФ атмосферы и ОЭС определены условия необходимости учета ОПФ атмосферы при обнаружении протяженных объектов в зависимости от характеристик ОЭС, атмосферы и размеров объектов.

Распространяя результаты теории оптимального приема сигналов на случай обнаружения пространственно-протяженных объектов, можно показать, что параметр обнаружения q , имеющий смысл отношения «сигнал/шум» [3], может быть вычислен по формуле

$$q = A Q K_{\Pi} , \quad (1)$$

где A — энергетический параметр, зависящий от вида статистики принимаемого сигнала; Q — параметр формы пространственно-протяженного объекта ($0 \leq Q \leq 1$); K_{Π} — максимальное значение истинного контраста объекта.

Параметр формы зависит от пространственно-частотных характеристик объекта, атмосферы и оптической системы и определяется по формуле

$$Q^2 = \int_{-S} R(\rho) \Phi_{\Sigma}(\rho) d\rho , \quad (2)$$

где

$$R(\rho) = \int_{-\infty}^{\infty} \Delta J(\mathbf{r}) \Delta J(\mathbf{r} - \rho) d\mathbf{r}$$

— корреляционная функция разностного (по альтернативным гипотезам H_1, H_0) изображения $\Delta J(\mathbf{r})$ в плоскости реальной сцены, \mathbf{r}, ρ — радиус-векторы, характеризующие рассматриваемую точку в плоскости объекта и входной оптики соответственно,

$$\Phi_{\Sigma}(\rho) = \int_{-\infty}^{\infty} |T_{\Sigma}(\rho)|^2 \exp(-2\pi j \rho \mathbf{v}) d\mathbf{v} , \quad (3)$$

$\nu = \rho/\lambda R$ — пространственная частота; λ — длина волны излучения; R — расстояние до объекта;

$$T_{\Sigma}(\rho) = T_a(\rho) \cdot T_o(\rho), \quad (4)$$

где $T_a(\rho)$ — ОПФ атмосферы или функция когерентности второго порядка поля сферической волны [4];

$$T_o(\rho) = \pi a_o^2 \exp(-\rho^2/a_o^2) (1 - \tau_p + \tau_p \exp(-\rho^2/a_p^2)) \quad (5)$$

— ОПФ объектива с учетом рассеяния света на материале, неровностях поверхности и пыли [5]; a_o — эффективный радиус входной оптики, τ_p — коэффициент рассеяния объектива; a_p — радиус кружка рассеяния.

Применительно к рассеивающей атмосфере в настоящее время разработано несколько подходов к определению ОПФ атмосферы [1, 2, 6], связанных с особенностями решаемых задач. Для решения задачи переноса изображения в условиях атмосферной дымки и в сравнительно тонких облачных слоях широко используется метод малоуглового приближения [6, 7]. Для сред с сильно вытянутыми индикатрисами рассеяния в предположении, что оптические характеристики среды не зависят от глубины слоя, выражение для ОПФ атмосферы определяется как [6]

$$T_a(\rho) = \exp \left[-\tau_o + \Lambda \int_0^{\tau_o} \kappa(\rho/\lambda \cdot \xi) d\xi \right], \quad (6)$$

где τ_o — оптическая толщина слоя; Λ — вероятность выживания кванта,

$$\kappa(\rho/\lambda \xi) = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} x(\beta) J_0(\rho/\lambda \cdot \xi \cdot \beta) \cdot \beta d\beta \quad (7)$$

— преобразование Ганкеля нулевого порядка от индикатрисы рассеяния $x(\beta)$.

Вид $T_a(\rho)$ в значительной степени зависит от аппроксимирующей функции индикатрисы рассеяния. Воспользовавшись аппроксимирующей функцией индикатрисы рассеяния вида [6]

$$x(\beta) = 2/b^2 \exp(-\beta^2/2b^2), \quad (8)$$

где b — аппроксимирующий параметр, для ОПФ атмосферы получим

$$T_a(\rho) = \exp \left[-\tau_o + \Lambda \sqrt{\pi/2} \lambda (\rho b)^{-1} \operatorname{erf}(\rho b \tau_o / \lambda \sqrt{2}) \right], \quad (9)$$

$$\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z \exp(-t^2) dt \text{ — интеграл вероятностей.}$$

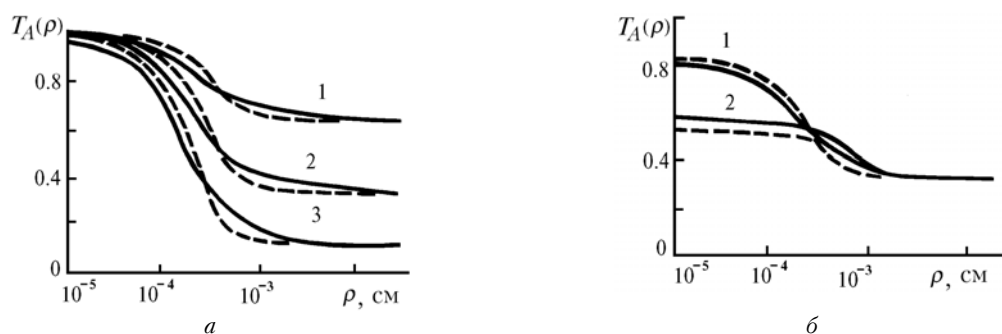


Рис. 1. ОПФ атмосферы и ее аппроксимация (штриховые кривые): $a - \Lambda = 1$; $1 - \tau_o = 0,4$; $2 - \tau_o = 1$; $3 - \tau_o = 2$; $b - \tau_o = 1$; $1 - \Lambda = 0,8$; $2 - \Lambda = 0,5$

На рис. 1 приведены зависимости $T_a(\rho)$ для чисто рассеивающей атмосферы (a) и с учетом поглощения (b); ($b = 0,5$).

Из анализа зависимости (9) следует, что передаточная функция рассеивающей атмосферы может быть представлена удобной для количественного анализа аппроксимирующей функцией (штриховая кривая)

$$T_a(\rho) = C + \Lambda(1 - C^\Lambda) \exp(-\rho^2/a_a^2), \quad (10)$$

где $a_a = \frac{2,55\lambda}{b\sqrt{\Lambda\tau_0}}$ – так называемый «радиус рассеяния атмосферы»,

$$C = \exp(-\tau_0).$$

Средняя погрешность аппроксимации для рассматриваемых условий составляет 5 ... 10%.

Используя полученное приближенное выражение для ОПФ атмосферы (10) и выражение (5) для ОПФ оптической системы, можно в явном виде записать корреляционную функцию разностного изображения (3) и проследить влияние характеристик рассеивающей атмосферы на параметр формы (1), а по изменению его величины оценить совместное влияние атмосферы и оптической системы на обнаружение удаленных пространственно-протяженных объектов.

Подставляя (10) и (5) в (3) и пренебрегая рассеянием света на объективе, получим

$$\begin{aligned} \Phi_{\Sigma}(\rho) &= C^2 \Phi_{\Sigma_0}(\rho) + \Lambda^2 (1 - C^{\Lambda})^2 \Phi_{\Sigma_1}(\rho) + 2C\Lambda(1 - C^{\Lambda}) \Phi_{\Sigma_2}(\rho); \\ \Phi_{\Sigma_i}(\rho) &= \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-2\rho^2/a_i^2) \exp(-2\pi j\rho v) dv, \quad (i = 0, 1, 2); \\ a_1 &= \left(\frac{a_0^2 a_a^2}{a_0^2 + a_a^2} \right)^{1/2}; \quad a_2 = \left(\frac{2a_0^2 a_a^2}{a_0^2 + 2a_a^2} \right)^{1/2}. \end{aligned} \quad (11)$$

Параметр формы с учетом (11) может быть представлен в виде

$$Q^2 = C^2 Q_0^2 + \Lambda^2 (1 - C^{\Lambda})^2 Q_1^2 + 2C\Lambda(1 - C^{\Lambda}) Q_2^2, \quad (12)$$

где Q_0 – параметр формы, зависящий от ОПФ оптической системы; Q_1 и Q_2 – параметры формы при совместном учете ОПФ атмосферы и оптической системы.

Влияние ОПФ атмосферы и оптической системы на характеристики обнаружения объекта рассмотрим применительно к объектам простой формы. Так, проведенные вычисления для прямоугольника со сторонами l_x , l_y приводят к следующим результатам:

$$Q_i^2 = f_i(x) f_i(y), \quad (i = 0, 1, 2), \quad (13)$$

где

$$\begin{aligned} f_i(x) &= 2F(\sqrt{2x_i}) - 1 - \frac{1 - \exp(-x_i)}{\sqrt{\pi x_i}}; \\ f_i(y) &= 2F(\sqrt{2y_i}) - 1 - \frac{1 - \exp(-y_i)}{\sqrt{\pi y_i}}; \\ x_i &= \frac{(\pi a_i)^2 l_x^2}{2(\lambda R)^2}; \quad y_i = \frac{(\pi a_i)^2 l_y^2}{2(\lambda R)^2}; \end{aligned}$$

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-t^2/2) dt \text{ — интеграл Лапласа.}$$

Результаты расчета параметра формы при обнаружении квадрата на дальности $R = 3$ км на горизонтальной приземной трассе для $\tau_0 = 0,4$; 1 и $A = 0,5$; 1 для эффективных радиусов оптической системы $a_0 = 0,1$ и 1 см и длины волны $\lambda = 0,5$ мкм приведены на рис. 2.

Для сравнения приведены значения Q_0^2 (кривые 1, рис. 2), зависящие от ОПФ оптической системы, и $C^2 Q_0^2$ (кривые 3 и 6), где учтено влияние ослабляющих свойств атмосферы.

Как видно из рисунка, при линейных размерах объекта менее 100 м ($l_x < 70 \dots 100$ м) $Q^2 \sim C^2 Q_0^2$ влияние атмосферы на обнаружение пространственно-протяженного объекта обусловлено только ослаблением излучения, т.е. детальный учет функциональной зависимости ОПФ атмосферы позволяет уточнить значение параметра формы (12) не более чем на единицы процентов. В то же время при обнаружении таких объектов на значение параметра формы существенно влияет разрешающая способность оптической системы. Так, изменение эффективного радиуса оптической системы с 0,1 до

1 см приводит к увеличению Q^2 (отношению «сигнал/шум») в среднем на 30% (кривые 5 и 2 на рис. 2, а и 2, б соответственно).

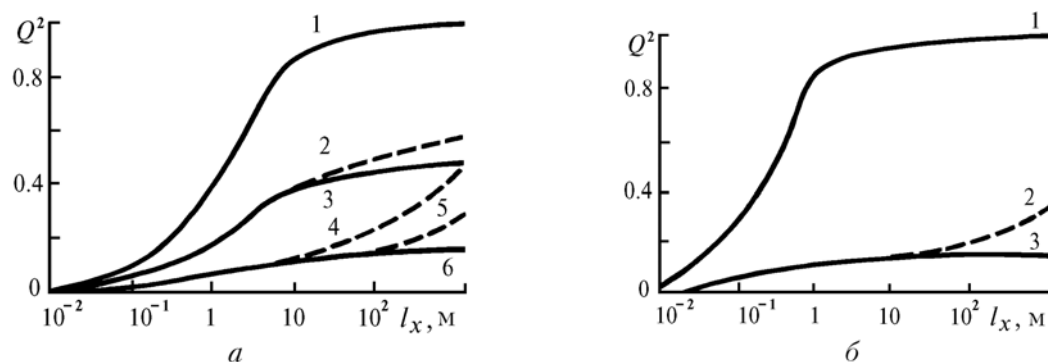


Рис. 2. Зависимость параметра формы от линейных размеров объекта: а — $a_0 = 0,1$ см; кривая 1 — $\tau_0 = 0$; $\Lambda = 0$ (Q_0^2); 2 — $\tau_0 = 0,4$; $\Lambda = 1$; 3 — $\tau_0 = 0,4$; $\Lambda = 0$ ($C^2Q_0^2$); 4 — $\tau_0 = 1$; $\Lambda = 1$; 5 — $\tau_0 = 1$; $\Lambda = 0,5$; 6 — $\tau_0 = 1$; $\Lambda = 0$ ($C^2Q_0^2$); б — $a_0 = 1$ см; 1 — $\tau_0 = 0$; $\Lambda = 0$ (Q_0^2); 2 — $\tau_0 = 1$; $\Lambda = 0,5$; 3 — $\tau_0 = 1$; $\Lambda = 0$ ($C^2Q_0^2$)

С увеличением размеров объектов начинает сказываться влияние на параметр формы рассеянного излучения и возникает необходимость учета функциональной зависимости ОПФ атмосферы от пространственно-частотных характеристик. Добавка, обусловленная рассеянным излучением, зависит от оптической толщины слоя и вероятности выживания кванта. Так, при линейных размерах объекта около 200 м величина добавки при $\tau_0 = 0,4$ составляет ~ 8%, а при $\Lambda = 1$ увеличивается до 50% для чисто рассеивающей атмосферы (кривые 2, 3 и 4, б на рис. 2, а). При наличии поглощения ($\Lambda = 0,5$) добавка уменьшается от 50 до 30% (кривые 5, б и 4, б).

Вместе с тем изменение разрешающей способности оптической системы приводит к изменению параметра формы таких объектов не более чем на единицы процентов.

Таким образом, проведенные оценки совместного влияния ОПФ атмосферы и оптической системы на характеристики обнаружения протяженных объектов показали следующее. При определении характеристик обнаружения малоразмерных протяженных объектов в горизонтальной однородной рассеивающей атмосфере необходимо учитывать ОПФ только оптической системы, а пространственно-частотные характеристики атмосферы могут не учитываться, так как пространственный спектр таких объектов лежит в асимптотической области изменения функции $T_a(\rho)$.

При обнаружении в этих условиях объектов размерами более 100–200 м влиянием на характеристики обнаружения ОПФ оптической системы можно пренебречь, а учитывать ОПФ атмосферы.

1. Имитационное моделирование в задачах оптического дистанционного зондирования /Под ред. В.Е. Зуева. Новосибирск: Наука, 1988. 161 с.
2. Джетыбаев Е.П., Мулдашев Т.З., Мишин И.В. //Оптика атмосферы. 1989. Т. 2 № 11. С. 1135–1139.
3. Ван-Трис Г. Теория обнаружения, оценок и линейной модуляции. Т. 1. /Под ред. В.И. Тихонова. М.: Сов. радио, 1972. 744 с.
4. Гудман Дж. Введение в Фурье-оптику. М.: Мир, 1970. 109 с.
5. Ллойд Дж. Системы тепловидения. М.: Мир, 1978. 414 с.
6. Зега Э.П., Иванов А.П., Кацев И.Л. Перенос изображения в рассеивающей среде. Минск: Наука и техника, 1985. 327 с.
7. Arnush D. //J. Opt. Soc. Am. 1972. V. 62. № 9. P. 1109–1111.

Поступила в редакцию
19 сентября 1991 г.

E.M. Afanas'eva, V.A. Pon'kin. **Joint Estimate of the Effect Optical Transfer Function of the Atmosphere and Optical System on Characteristics of Detection of Extended Objects.**

Based on the theory of detection of spatially extended objects and using the optical transfer operators technique, a quantitative estimate of joint action of the atmospheric and optical system transfer functions on the detection of extended objects is performed. The estimation of OTF of the atmosphere is performed within the frameworks of small angle approximation.