

С.А. Покотило, С.Н. Ковпак

**ПРОБЛЕМЫ СОЗДАНИЯ АТМОСФЕРНО-АДАПТИВНЫХ
ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ НАБЛЮДЕНИЯ**

Рассматриваются проблемы создания атмосферно-адаптивных оптико-электронных систем наблюдения, связанные с получением текущей информации о состоянии атмосферы и с прогнозированием ее параметров и характеристик, в частности функций передачи модуляции и функции спектрального пропускания.

Фундаментальной перспективой дальнейшего развития оптикоэлектронных систем наблюдения (ОЭСН) земной поверхности (ЗП) через атмосферу является создание их адаптивных аналогов, способных изменять свои параметры и структуру по мере поступления информации об изменении параметров атмосферно-оптического канала (АОК), зондируемой поверхности и носителя аппаратуры с целью достижения оптимальности заданных характеристик [1–3].

В задачах адаптивного управления стохастическим процессом наблюдения ЗП через атмосферу возникает необходимость оперативного и точного измерения оптической передаточной функции (ОПФ) и функции спектрального пропускания (ФСП) атмосферы по вертикальным и наклонным трассам [1–6]. На эти характеристики существенное влияние оказывают пространственно-временные распределения таких параметров АОК, как размер рассеивающих частиц $a_p(x, y, z, t)$, структурная постоянная показателя преломления $C_n^2(x, y, z, t, \lambda)$, температура воздуха $T(x, y, z, t)$, толщина слоя осажденной воды $w(x, y, z, t)$, плотность воздуха $\rho(x, y, z, t)$, атмосферное давление $p(x, y, z, t)$, которые изменяются в пространстве и во времени случайным образом.

При разработке алгоритмов функционирования адаптивных ОЭСН с эталонными и прогнозирующими моделями возникает необходимость использования ОПФ турбулентной и замутненной атмосферы, интегрально усредненных в пределах измерения параметров АОК и в пределах рабочего спектрального диапазона ОЭСН. Поскольку под системами наблюдения будем понимать некогерентные ОЭСН, далее речь пойдет о модулях полихроматических функций передачи модуляции турбулентной и замутненной атмосферы.

В общем виде усредненная модуляционная передаточная функция (ФПМ) АОК может быть представлена в виде

$$T(\nu) = \left(\Delta\lambda \prod_{l=1}^n \Delta p_l \right)^{-1} \int_{p_{11}}^{p_{12}} \dots \int_{p_{n1}}^{p_{n2}} T(\nu, \lambda, p_1, \dots, p_n) d\lambda dp_1 \dots dp_n \quad (1)$$

где $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$, λ_1, λ_2 – границы спектрального диапазона ОЭСН; $p_{11} \dots p_{12}, \dots, p_{n1} \dots p_{n2}$ – границы диапазонов изменения параметров p_1, \dots, p_n .

В данной статье получены аналитические выражения статистически усредненных по параметрам атмосферы ФПМ турбулентной и замутненной атмосферы на основе использования результатов, полученных в [2, 3]. Усредненная по $C_n^2(\lambda)$ полихроматическая ФПМ турбулентной атмосферы, при условии слабой зависимости этой функции в пределах спектрального диапазона работы ОЭСН от длины волны, после интегрирования имеет вид

$$m \{T_{\tau,a}(\nu, \Delta\lambda, \Delta C_n^2)\} = (\Delta C_n^2)^{-1} \int_{C_{n1}^2}^{C_{n2}^2} \left[1 + \frac{3a}{2\Delta\lambda} (\lambda_2^{2/3} - \lambda_1^{2/3}) + \frac{3a^2}{2\Delta\lambda} (\lambda_2^{1/3} - \lambda_1^{1/3}) \right] d(C_n^2),$$

$$m \{T_{\tau,a}(\nu, \Delta\lambda, \Delta C_n^2)\} = 1 - a_1 (C_{n1}^2 + C_{n2}^2) + a_2 \frac{C_{n2}^6 - C_{n1}^6}{\Delta C_n^2}, \quad (2)$$

где $a_1 = 8,58(H \sec \beta) \nu^{5/3} (\lambda_2^{2/3} - \lambda_1^{2/3})$; $a_2 = 32,72(H \sec \beta)^2 \lambda^{10/3} (\lambda_2^{1/3} - \lambda_1^{1/3})$; H – высота наблюдения; β – угол визирования, отсчитываемый от вертикали; ν – обобщенная пространственная частота; m – символ математического ожидания.

Турбулентный слой АОК можно представить как последовательно соединенные линейные системы с ФПМ $\bar{T}_i(\nu)$, различающимися значениями параметров H и C_n^2 . Общая ФПМ такой вертикальной трассы турбулентной атмосферы равна:

$$\bar{T}_1(\nu) = \exp(-k(\nu) C_{n1}^2 \Delta H_1),$$

$$\begin{aligned} \bar{T}_i(\nu) &= \exp(-k(\nu) C_{n1}^2 \Delta H_1) \exp(-k(\nu) C_{n2}^2 \Delta H_2) \dots \exp(-k(\nu) C_{nm}^2 \Delta H_m) = \\ &= \exp(-k(\nu) \sum_{i=1}^m C_{ni}^2 \Delta H_i), \end{aligned}$$

где $k(\nu)$ – некоторая функция пространственной частоты; C_{ni}^2 – структурная функция показателя преломления i -го слоя; ΔH_i – толщина i -го слоя.

ФПМ замутненной атмосферы зависит от величины параметра рассеяния $\rho_p = 2\pi a_p \lambda^{-1}$ [10], где a_p – размер рассеивающей частицы. Поэтому исходную монохроматическую ФПМ замутненной атмосферы [9] следует поочередно усреднить по λ и по a_p . Усреднение по λ дает следующее выражение:

$$\begin{aligned} m\{T_{3.a}(\nu, \Delta\lambda)\} &= (\Delta\lambda)^{-1} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \left[1 + \left(\frac{f'\nu}{2\pi} \right)^2 \frac{\lambda^2}{a_p^2} \right]^{-1} d\lambda, \\ m\{T_{3.a}(\nu, \Delta\lambda)\} &= (\Delta\lambda)^{-1} \left\{ \left[\left(\frac{2\pi a_p}{f'\nu} \right)^2 + \lambda_2^2 \right]^{0.5} - \left[\left(\frac{2\pi a_p}{f'\nu} \right)^2 + \lambda_1^2 \right]^{0.5} \right\}, \end{aligned} \quad (3)$$

где f' – фокусное расстояние приемного объектива ОЭСН.

В результате усреднения выражения (3) по a_p получим

$$\begin{aligned} m\{T_{3.a}(\nu, \Delta\lambda, \Delta a_p)\} &= (\Delta\lambda \Delta a_p)^{-1} \left\{ \int_{a_{p1}}^{a_{p2}} \left[\left(\frac{2\pi a_p}{f'\nu} \right)^2 + \lambda_2^2 \right] da_p - \int_{a_{p1}}^{a_{p2}} \left[\left(\frac{2\pi a_p}{f'\nu} \right)^2 + \lambda_1^2 \right] da_p \right\}, \\ m\{T_{3.a}(\nu, \Delta\lambda, \Delta a_p)\} &= (\Delta\lambda \Delta a_p)^{-1} \left\{ \frac{1}{2} \left[a_p \left[a_p^2 + \left(\frac{\lambda_2 f'}{2\pi} \right)^2 \nu^2 \right]^{0.5} + \right. \right. \\ &+ \left. \left(\frac{\lambda_2 f'}{2\pi} \right)^2 \nu^2 \ln \left| a_p^2 + \left[a_p^2 + \left(\frac{\lambda_2 f'}{2\pi} \right)^2 \nu^2 \right]^{0.5} \right| \right] \Big|_{a_{p1}}^{a_{p2}} - \frac{1}{2} \left[a_p \left[a_p^2 + \left(\frac{\lambda_1 f'}{2\pi} \right)^2 \nu^2 \right]^{0.5} + \left(\frac{\lambda_1 f'}{2\pi} \right)^2 \nu^2 \times \right. \\ &\left. \left. \times \ln \left| a_p^2 + \left[a_p^2 + \left(\frac{\lambda_1 f'}{2\pi} \right)^2 \nu^2 \right]^{0.5} \right| \right] \Big|_{a_{p1}}^{a_{p2}} \right\}. \end{aligned} \quad (4)$$

При приближении носителя ОЭСН вокруг него может возникать турбулентный пограничный слой, который искажает пространственно-частотный спектр изображаемой поверхности. Монохроматическая ФПМ турбулентности, вызванной наличием пограничного слоя, описывается выражением [11]:

$$T_{п.с}(\nu, \mu) = \exp \left[- \frac{4\pi^2 \Delta^2 \nu^2}{(\nu_0^2 + \nu^2) \lambda^2} \right], \quad (5)$$

где $\nu_0 = \delta(10\lambda f')^{-1}$; δ – толщина пограничного слоя; Δ – среднее квадратическое отклонение волнового фронта, м; для $M < 2$ справедлива приближенная формула [11]:

$$\Delta = 3 \cdot 10^{-6} \delta \rho M^2 (1 + 0,1 M^2)^{-1},$$

где ρ – относительная плотность воздуха; M – число Маха.

Формулу (5) приведем к более удобному виду

$$T_{п.с}(\nu, \mu) = \exp(-a_n \lambda_\tau^2), \quad (6)$$

где $a_n = 4\pi^2 \Delta^2 \nu^2 (\nu_0^2 + \nu^2)^{-1}$; $\lambda_\tau = \lambda^{-1}$, и найдем выражение для ФПМ:

$$\bar{T}_{п.с}(\nu) = \frac{1}{\Delta\lambda} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \exp(-a_n \lambda_\tau^2) d\lambda.$$

Выразим $d\lambda$ через λ_τ :

$$d\lambda = -\lambda_{\tau}^{-2} d\lambda_{\tau}.$$

Тогда (6) перепишем в виде

$$\bar{T}_{n.c}(\nu) = \frac{1}{\Delta\lambda} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\exp(-a_n \lambda_{\tau}^2)}{\lambda_{\tau}^2} d\lambda_{\tau}. \quad (7)$$

Воспользуемся табличным интегралом вида [12]

$$\int \frac{\exp(-ax^2)}{x^p} dx = -\frac{\exp(-ax^2)}{(p-1)x^{p-1}} - \frac{2a}{p-1} \int \frac{\exp(-ax^2)}{x^{p-2}} dx, \quad (8)$$

и в результате интегрирования получим

$$\begin{aligned} \bar{T}_{n.c}(\nu) = & -\frac{1}{\Delta\lambda} \left[-\frac{\exp(-a_n \lambda_{\tau}^2)}{(2-1)\lambda_{\tau}^{(2-1)}} \Big|_{\lambda_1}^{\lambda_2} - \frac{2a_n}{2-1} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\exp(-a_n \lambda_{\tau}^2)}{\lambda_{\tau}^{(2-2)}} d\lambda_{\tau} \right] = \frac{1}{\Delta\lambda} \left[\frac{\exp(-a_n \lambda_{\tau}^2)}{\lambda_{\tau}} \Big|_{\lambda_1}^{\lambda_2} + \right. \\ & \left. + 2a_n \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \exp(-a_n \lambda_{\tau}^2) d\lambda_{\tau} \right]. \end{aligned} \quad (9)$$

Для вычисления интеграла, входящего в (9), воспользуемся табличным интегралом [12]

$$\int_0^x \exp(-a_1^2 x^2) dx = \frac{\pi^{0.5}}{2a_1} \operatorname{erf}(a_1 x). \quad (10)$$

Искомый интеграл найдем как разность интегралов вида (10)

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} = \int_0^{\lambda_2} - \int_0^{\lambda_1},$$

то есть

$$\begin{aligned} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \exp(-a_1^2 \lambda_{\tau}^2) d\lambda_{\tau} &= \int_0^{\lambda_2} \exp(-a_1^2 \lambda_{\tau}^2) d\lambda_{\tau} - \int_0^{\lambda_1} \exp(-a_1^2 \lambda_{\tau}^2) d\lambda_{\tau} = \frac{\pi^{0.5}}{2a_1} \operatorname{erf}(a_1 \lambda_2) - \frac{\pi^{0.5}}{2a_1} \operatorname{erf}(a_1 \lambda_1) = \\ &= \frac{\pi^{0.5}}{2a_1} [\operatorname{erf}(a_n^{0.5} \lambda_2) - \operatorname{erf}(a_n^{0.5} \lambda_1)]. \end{aligned} \quad (11)$$

В выражениях (10), (11) $a_1 = a_n^{0.5}$, $\operatorname{erf}(a_n^{0.5} \lambda_2)$, $\operatorname{erf}(a_n^{0.5} \lambda_1)$ — интегралы вероятности по соответствующим аргументам.

Подставив (11) в (9), получим окончательное выражение для полихроматической ФПМ турбулентного пограничного слоя

$$\bar{T}_{n.c}(\nu) = \frac{1}{\Delta\lambda} \left\{ \lambda \exp(-a_n \lambda^{-2}) \Big|_{\lambda_1}^{\lambda_2} + a_n \frac{\pi^{0.5}}{a_n^{0.5}} [\operatorname{erf}(a_n^{0.5} \lambda_2) - \operatorname{erf}(a_n^{0.5} \lambda_1)] \right\}, \quad (12)$$

где $a_n = a_n(\nu)$.

В формулу (12) необходимо подставлять и усредненное значение параметра ν_0 (см. (5)). В результате усреднения по λ получим

$$\bar{\nu}_0 = \frac{1}{\Delta\lambda} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \nu_0(\lambda) d\lambda = \frac{1}{\Delta\lambda} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\delta}{10f' \lambda} d\lambda, \quad \bar{\nu}_0 = \frac{\delta}{10f' \Delta\lambda} (\ln \lambda_2 - \ln \lambda_1).$$

С помощью бортовых датчиков необходимо прогнозировать изменение размеров рассеивающих частиц и структурной функции показателя преломления по высоте в районе наблюдения и в формулы

(2) и (4) подставлять вместо C_n^2 и a_p их математические ожидания. На рис. 1, 2 приведены результаты расчета усредненных полихроматических ФПМ при различных значениях C_n^2 и a_p и для различных углов визирования ОЭСН.

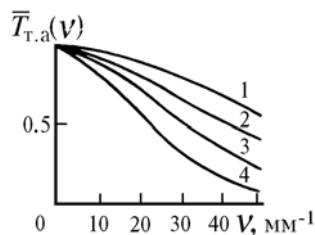


Рис. 1. Усредненные полихроматические ФПМ турбулентной атмосферы, полученные при $H = 500$ м, $\bar{\lambda} = 4$ мкм: 1 – $C_n^2 = 10^{-15} \text{ м}^{-2/3}$, $\beta = 0$; 2 – $C_n^2 = 10^{-9} \text{ м}^{-2/3}$, $\beta = 0$; 3 – $C_n^2 = 10^{-9} \text{ м}^{-2/3}$, $\beta = 30^\circ$; 4 – $C_n^2 = 10^{-9} \text{ м}^{-2/3}$, $\beta = 60^\circ$

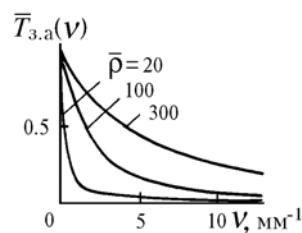


Рис. 2. Усредненные полихроматические ФПМ за-мутненной атмосферы ($\bar{\rho} = 2\pi a_p \bar{\lambda}^{-1}$)

При прохождении излучения через слой атмосферы происходит его энергетическое ослабление за счет молекулярного поглощения и аэрозольного рассеяния, поэтому ФСП можно записать в виде

$$\tau_A(\lambda) = \tau_{A1}(\lambda) \tau_{A2}(\lambda) \tau_{A3}(\lambda),$$

где $\tau_{A1}(\lambda)$, $\tau_{A2}(\lambda)$, $\tau_{A3}(\lambda)$ – составные части ФСП, обусловленные молекулярным рассеянием, поглощением и аэрозольным рассеянием соответственно. В инфракрасной области спектра $\tau_{A1}(\lambda) \approx 1$ [13], поэтому ограничимся оценкой составляющих $\tau_{A2}(\lambda)$ и $\tau_{A3}(\lambda)$.

Составляющая ФСП $\tau_{A2}(\lambda)$, учитывающая поглощение излучения атмосферными газами, зависит от их концентрации в атмосфере и протяженности трассы. Основными поглощающими газами являются водяной пар, углекислый газ и озон:

$$\tau_{A2}(\lambda) = \tau_{A2}^{(H_2O)}(\lambda) \tau_{A2}^{(CO_2)}(\lambda) \tau_{A2}^{(O_3)}(\lambda).$$

Влияние водяного пара прогнозируется путем создания модели вертикально-наклонной трассы, основанной на принципе расслоения столба атмосферы высотой Z на N слоев одинаково малой высоты. Тогда можно утверждать, что основные параметры атмосферы внутри слоя не изменяются вдоль координаты z [14]. Оценка величины $\tau_{A2}^{(H_2O)}(\lambda)$ производится по таблицам Пассмана – Лармора [15], для чего необходимо определить толщину слоя осаждающей воды $w(x, y, z, t)$, являющуюся функцией параметров состояния атмосферы:

$$w(x, y, z, t) = F(Z, f, p, T) = \sum_{j=1}^N w_j(Z, f, p, T),$$

$$w_j(Z, f, p, T) = 289,4 (273 + T_j)^{-1} q_j P_j (622 + 0,378 q_j)^{-1} f \Delta Z,$$

где $q_j = q_0 \exp(-0,5 \Delta Z_j)$ – удельная влажность воздуха в j -м слое; $\Delta Z = Z/N$ – толщина слоя, $q_0 = 622 e (P_0 - 0,378 e)^{-1}$ – удельная влажность воздуха на высоте $Z = 0$; $P_j = \exp\{\ln P_0 - g_0[(T - T_0) \times \times N^{-1} R]^{-1} \ln(T_j T_0^{-1})\}$ – давление атмосферы в j -м слое; $e = \exp\{\ln 4,58 + [7,5(\tau / 237,3 + \tau)] \ln 10\}$ – упругость насыщенного водяного пара; p_0 , T_0 – давление и температура воздуха у поверхности земли; j – порядковый номер слоя; g_0 – ускорение свободного падения; T – температура воздуха на высоте Z ; R – универсальная газовая постоянная воздуха; $T_j = T_0 + [(T - T_0)/N]$ – температура воздуха в j -м слое; f – относительная влажность воздуха у поверхности земли, τ – точка росы водяного пара.

Коэффициент пропускания излучения углекислым газом $\tau_{A2}^{(CO_2)}(\lambda)$ определяется по таблицам [15], где входным параметром является эквивалентная трасса

$$Z_{\text{эkv}} = \sum_{j=1}^N \Delta Z_j \left(\frac{P_{zj}}{P_{z(j-1)}} \right)^{1,5}.$$

При оценке значения $\tau_{A3}^{(O_3)}(\lambda)$ использовались среднестатистические данные, приведенные в [10].

Коэффициент пропускания излучения за счет аэрозольного рассеяния $\tau_{A3}(\lambda)$ существенно зависит от размеров и концентрации частиц аэрозоля, сосредоточенного в атмосфере. Оценка величины $\tau_{A3}(\lambda)$ производилась по методике, предложенной в [10]:

$$k(\lambda, Z_1, Z_2, \beta) = \sec \beta \cdot 3,912 S_m^{-1} \omega(\lambda) b^{-1} [\exp(-bZ_1) - \exp(-bZ_2)],$$

где $b = 2,78 - 0,46 \lg S_m(0)$; $k(\lambda, Z_1, Z_2, \beta)$ — показатель аэрозольного рассеяния; β — угол наклона трассы; S_m — метеорологическая дальность видимости; Z_1 и Z_2 — высоты нижней и верхней границ атмосферного столба; $\omega(\lambda) = \alpha(\lambda) \cdot \alpha(0,5)^{-1}$; $\alpha(\lambda)$ и $\alpha(0,5)$ — коэффициенты ослабления на длине волны λ и 0,5 мкм соответственно.

В условиях реальной атмосферы аэрозольные частицы имеют, как правило, водную оболочку. Поэтому показатель преломления частицы с водяной оболочкой становится комплексной величиной, что приводит к усложнению расчетов $\tau_{A3}(\lambda)$. В результате численного моделирования была получена зависимость ФСП от длины волны в диапазоне 7 ... 14 мкм (рис. 3), которая хорошо согласуется с результатами [9, 10, 13], однако точность ее прогнозирования существенно зависит от точности бортовых датчиков измерения параметров атмосферы. В наибольшей степени ФСП зависит от точности измерения температуры воздуха: изменение ее значения на 1 К приводит к изменению величины $\tau_A(\lambda)$ на 1,3%, что подтверждает результаты работы [13]. Изменение остальных параметров атмосферы в меньшей степени влияет на распространение излучения.

Таким образом, основные проблемы создания атмосферно-адаптивных ОЭСН и их алгоритмического обеспечения состоят в измерении и прогнозировании с заданной точностью высотных профилей температуры, давления, относительной влажности, структурной функции показателя преломления, а также типа аэрозоля в приземном слое атмосферы и высотных профилей его размеров и концентрации.

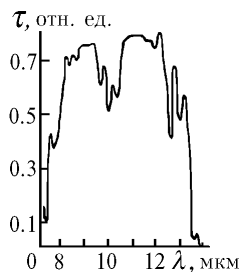


Рис. 3. Зависимость функции спектрального пропускания атмосферы от длины волны для определенных условий наблюдения. $P_0 = 730$ мм рт. ст.; $\tau_0 = 293$ К; $H = 1000$ м, $f = 70\%$, $S_m(0) = 1$ км

1. Белинский В.Н., Покотило С.А. // Научно-методические материалы по вопросам повышения эффективности и надежности систем авиационного оборудования. Киев: КВВАИУ, 1982. С. 17–20.
2. Покотило С.А. // Тез. докл. V Конф. молодых ученых вузов Иркут, обл. Иркутск: ИГУ, 1987. Ч. I. С. 116.
3. Покотило С.А. // Тез. докл. XVI Всесоюзн. конф. по распространению радиоволн. Харьков: ХПИ. 1990. Ч. 2. С. 313.
4. Калинин А.Н., Комаров В.С. // Тез. докл. XV Всесоюзн. конф. по распространению радиоволн. Алма-Ата: ИИ АН КазССР, 1987. С. 355.
5. Покотило С.А. // Повышение эффективности авиационных иконических систем. Иркутск: ИВВДИУ, 1987. С. 18–24.
6. Зуев В.Е. // Оптика атмосферы, 1988. Т. 1. № 1. С. 5.
7. Ковпак С.Н., Покотило С.А. // Тез. докл. XV Всесоюзн. конф. по распространению радиоволн. Харьков: ХПИ. 1990. Ч. 2. С. 314.
8. Ноеке А.Р. // Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. 15th Congr., Rio de Janeiro, 1984. V. 25. P. 132–140.
9. Зуев В.Е., Кабанов М.В. Перенос оптических сигналов в земной атмосфере (в условиях помех). М.: Сов. радио, 1977. 368 с.
10. Зуев В.Е. Распространение видимых и инфракрасных волн в атмосфере. М.: Сов. радио, 1970. 496 с.
11. Алексеев В.И., Бондарский И.А. Разведывательное и светотехническое оборудование летательных аппаратов. М.: ВВИА, 1971. 576 с.
12. Прудников А.П., Брычков Ю.А., Маричев О.И. Интегралы и ряды. М.: Наука, 1981. 798 с.
13. Зуев В.Е., Креков Г.М. Оптические модели атмосферы. Л.: Гидрометеониздат, 1986. 256 с.
14. Орлов В.М., Самохвалов И.В., Креков Г.М. и др. Сигналы и помехи в лазерной локации. М.: Радио и связь, 1985. 264 с.
15. Госсорг Ж. Инфракрасная термография. М.: Мир, 1988. 416 с.

Иркутское высшее военное авиационное инженерное училище

Поступила в редакцию
10 марта 1992 г.

S.A. Pokotilo, S.N. Kovpak. **Some Problems of Creating the Atmospheric Adaptive Opto-Electronic Vision Systems.**

Some problems of creating the atmospheric adaptive optoelectronic vision systems related to acquisition of a current information about the atmosphere and to forecasting its parameters like, for example, the modulation transfer function and the spectral transmission function are considered.