УДК 629.7

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АТМОСФЕРЫ КАК ЗВЕНА ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ ИКОНИЧЕСКИХ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ ВОЗДУШНОЙ РАЗВЕДКИ

Е.В. Чаусов, А.С. Молчанов

Представлена разработанная математическая модель атмосферы как звена процесса формирования изображения иконических оптико-электронных систем воздушной разведки и оценена возможность ее применения в процессе формирования изображения и использования его в обобщенной математической модели оптико-электронной системы.

Ключевые слова: модель атмосферы, оптико-электронная система, иконическая система, формирование изображения, система воздушной разведки.

Математическое моделирование процесса формирования изображений иконических оптико-электронных систем воздушной разведки основывается на применении методов теории линейной фильтрации, являющейся частью Фурье-анализа, используемого для изучения реакции на сигнал линейных инвариантных устойчивых систем [1, 2]. При этом процесс обработки информации условно может быть представлен в виде системы последовательного соединения отдельных передаточных звеньев. Каждое звено имеет свое физическое содержание и оказывает специфическое влияние на сигнал, несущий информацию. Каждое звено иконической оптико-электронной системы (ИОЭС) описывается своей оптической передаточной функцией (ОПФ). Оптическая передаточная функция является комплексной величиной, характеризующей способность системы изображения воспроизводить пространственные частоты, содержащиеся в спектре частот объекта. Модуль ОПФ, выходом которого является амплитуда реакции системы на синусоидальное распределение, называется функцией передачи модуляции (ФПМ). Результирующая ФПМ ИОЭС рассчитывается как произведение ФПМ отдельных звеньев системы [1-4].

Одним из звеньев, существенно оказывающих влияние на качество получаемого изображения является ФПМ атмосферы. При распространении оптического излучения земной поверхности в атмосфере оно подвергается пространственно-спектральному искажению и энергетическому ослаблению [5, 6], что приводит к снижению качества формируемого изображения. С целью компенсации влияния среды на качество изображения возникает необходимость оценивания искажения средой оптического сигнала. С этой целью необходимо оценить влияние состояния среды на прохождение излучения в каждом спектральном диапазоне.

На ФПМ существенное влияние оказывают пространственно-временные распределения таких характеристик атмосферно-оптического канала, как: размер рассеивающих частиц $a_p(x, y, z, t)$, структурная функция показателя преломления $C_n^2(x, y, z, t)$, толщина слоя осажденной воды

$\omega(x,y,z,t)$, плотность воздуха $\rho(x,y,z,t)$, атмосферное давление $P(x,y,z,t)$, которые изменяются в пространстве и во времени случайным образом. При этом возникает необходимость использования ОПФ турбулентной и замутненной атмосферы, интегрально усредненных в пределах изменения вышеперечисленных случайных характеристик атмосферно-оптического канала и в пределах рабочего спектрального диапазона $\Delta\lambda$ ИОЭС [2, 7-9]. В результате проведенных исследований получены аналитические выражения статистически усредненных по характеристикам атмосферы ФПМ турбулентной и замутненной атмосферы на основе использования результатов, полученных в [5, 6, 10]. Усредненная по $C_n^2(\lambda)$ полихроматическая ФПМ турбулентной атмосферы, при условии слабой зависимости этой функции в пределах спектрального диапазона работы системы от длины волны, после интегрирования имеет вид:

$$\overline{T}_{TA}\left(\nu,\Delta\lambda,C_n^2\right)=1-a_1\left(C_{n1}^2+C_{n2}^2\right)+a_2\left(C_{n2}^6+C_{n1}^6\right)\Delta C_n^{-2},$$

где $a_1=8{,}58(Z\sec\beta)N^{\frac{5}{3}}\left(\lambda_2^{\frac{2}{3}}-\lambda_1^{\frac{2}{3}}\right)$; $a_2=32{,}72\,(Z\sec\beta)^2N^{\frac{10}{3}}\left(\lambda_2^{\frac{1}{3}}-\lambda_1^{\frac{1}{3}}\right)$; Z – высота наблюдения; β – угол визирования, отсчитываемый от вертикали; N – обобщенная пространственная частота.

Турбулентный слой атмосферно-оптического канала можно представить как последовательно соединенные линейные системы с ФПМ $W_i(N)$, различающимися значениями Z и C_n^2. Общая ФПМ такой вертикальной трассы турбулентной атмосферы описывается выражением:

$$\overline{W}_{TA}(N)=\exp\left[-k(N)\sum_{i=1}^{m}C_{n_i}^2\Delta Z_i\right],$$

где $k(N)$ – некоторая функция пространственной частоты; $C_{n_i}^2$ – структурная функция показателя преломления i-го слоя, ΔZ_i – толщина i-го слоя.

ФПМ замутненной атмосферы, которая зависит от величины характеристики рассеяния $\rho_p=2\pi a_p\lambda^{-1}$, где a_p – размер рассеивающей частицы, следует поочередно усреднить по λ и a_p. Усреднение по λ дает следующее выражение:

$$\overline{W}_{TA}(N,\Delta\lambda)=(\Delta\lambda)^{-1}\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}\left[1+\left(\frac{f'N}{2\pi}\right)^2\frac{\lambda^2}{a_p^2}\right]^{-1}d\lambda,$$

$$\overline{W}_{TA}(N,\Delta\lambda)=(\Delta\lambda)^{-1}\left\{\left[\left(\frac{2\pi a_p}{f'N}\right)^2+\lambda_2^2\right]^{-0{,}5}-\left[\left(\frac{2\pi a_p}{f'N}\right)^2+\lambda_1^2\right]^{-0{,}5}\right\},$$

где f' – фокусное расстояние объектива ИОЭС.

В результате усреднения выражения (3) по a_p получим:

$$\overline{W}_{TA}\left(N,\Delta\lambda,\Delta a_p\right)=\left(\Delta\lambda\Delta a_p\right)^{-1}\left\{0{,}5\left[a_p\left[a_p^2+\left(\frac{\lambda_2 f'}{2\pi}\right)^2\nu^2\right]^{0{,}5}+\left(\frac{\lambda_2 f'}{2\pi}\right)^2 N^2\times\right.\right.$$

$$\left.\times\ln\left|a_p^2+\left[a_p^2+\left(\frac{\lambda_2 f'}{2\pi}\right)N^2\right]^{0{,}5}\right|\right]\Bigg|_{a_{p_1}}^{a_{p_2}}-0{,}5\left[a_p\left[a_p^2+\left(\frac{\lambda_1 f'}{2\pi}\right)^2 N^2\right]^{0{,}5}+\left(\frac{\lambda_1 f'}{2\pi}\right)\times\right.$$

$$\left.\left.\times N^2\ln\left|a_p^2+\left[a_p^2+\left(\frac{\lambda_1 f'}{2\pi}\right)^2 N^2\right]^{0{,}5}\right|\right]\Bigg|_{a_{p_1}}^{a_{p_2}}.$$

Во время полета летательного аппарата – носителя ИОЭС вокруг него возникает турбулентный пограничный слой, который искажает пространственно-частотный спектр изображаемой поверхности. Монохроматическая ФПМ турбулентности, вызванной наличием пограничного слоя, описывается выражением [7]:

$$W_n(N)=\exp\left[-\frac{4\pi\Delta^2N^2}{\left(N_0^2+N^2\right)\lambda^2}\right],$$

где $N_0=(10\lambda a)^{-1}$; δ – толщина пограничного слоя; Δ – среднее квадратическое отклонение волнового фронта; для $M>2$ справедлива приближенная формула [2, 6]:

$$\Delta=3\cdot10^{-6}\delta\rho M^2\left(1+0{,}1M^2\right)^{-1},$$

где ρ – плотность воздуха; M – число Маха.

Одним из сложных вопросов, возникающих при решении уравнения монохроматической ФПМ турбулентности, вызванной наличием пограничного слоя, является определение толщины пограничного слоя δ, в которой происходит турбулентное перемешивание воздуха. Из наблюдений за формой течения набегающего воздушного потока установлено, что для случая несжимаемой среды течение вдоль плоской поверхности остается ламинарным до тех пор, пока число Рейнольдса (Re), устанавливающее связь между скоростью набегающего потока воздуха V, его кинетической вязкостью ν и длиной плоской поверхности l, не превышает значения $3{,}2\cdot10^5$ [5, 11, 12]:

$$\mathrm{Re}=\frac{Vl}{\nu}<3{,}2\cdot10^5.$$

Если Re становится больше $3{,}2 \cdot 10^5$, то значение толщины пограничного слоя начинает резко возрастать – это означает, что в пограничном слое произошел переход ламинарной формы течения в турбулентную. В зависимости от формы обтекания воздушным потоком плоской поверхности толщина пограничного слоя может быть рассчитана по формулам для ламинарного течения:

$$\delta = 5l\,\mathrm{Re}^{-0{,}5}$$

и для турбулентного течения:

$$\delta = 0{,}37\,l\,\mathrm{Re}^{-0{,}2}.$$

Запишем уравнение монохроматической ФПМ турбулентности, вызванной наличием пограничного слоя, в более удобном виде:

$$W_n(N) = \exp\left(-a_n\lambda_T^2\right),$$

где $a_n = 4\pi^2\Delta^2N^2\left(N_0^2+N^2\right)^{-1}$; $\lambda_T = \lambda^{-1}$, и, произведя необходимые преобразования, найдем выражение для полихроматической ФПМ турбулентного пограничного слоя:

$$\overline{W}_{TA}(N) = \frac{1}{\Delta\lambda}\left\{\lambda\exp\left(-a_n\lambda_T^2\right)\Big|_{\lambda_1}^{\lambda_2} + 2a_n\frac{\pi^{0,5}}{2a_n^{0,5}}\left[\mathrm{erf}\left(a_n^{0,5}\lambda_2\right)-\mathrm{erf}\left(a_n^{0,5}\lambda_1\right)\right]\right\},$$

где $a_n = a_n(N)$.

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

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

где $\tau_{A1}(\lambda), \tau_{A2}(\lambda), \tau_{A3}(\lambda)$ – составные части ФСП, обусловленные молекулярным рассеянием, поглощением и аэрозольным рассеянием соответственно.

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

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

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 характеристики атмосферы внутри слоя не изменяются вдоль координаты Z [13]. Оценка величины $\tau_{\mathrm{A2}}^{H_2O}(\lambda)$ производится по таблицам Пассмана-Лармора [14], для чего необходимо рассчитать толщину слоя осажденной воды $\omega(x,y,z,t)$, являющуюся функцией характеристик состояния атмосферы:

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

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

где $q_j = q_0 \exp\left(-0{,}5\ \Delta Z_j\right)$ – удельная влажность воздуха в j-м слое; $\Delta Z_j = ZN^{-1}$ – толщина слоя; $q_0 = 622\ e\left(P_0 - 0{,}378\ e\right)^{-1}$ – удельная влажность воздуха на высоте $Z=0$, $P_j = \exp\left\{ \ln P_0 - p_0\left[(T-T_0)N^{-1}R\right]^{-1} \ln\left(T_j T_0^{-1}\right)\right\}$ – давление атмосферы в j-м слое, $e = \exp\{1{,}52 + 2.3\cdot[7{,}5(\tau/237{,}3+\tau)]\}$ – 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_j – температура воздуха в j-м слое; f – относительная влажность воздуха у поверхности Земли, τ – точка росы водяного пара.

Коэффициент пропускания излучения углекислым газом $\tau_{\text{A}2}^{CO_2}(\lambda)$ определяется по таблицам [5, 14] на основании величины

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

При расчете оценки значения $\tau_{\text{A}2}^{O_3}(\lambda)$ используются среднестатистические данные, приведенные в [6].

Коэффициент пропускания за счет аэрозольного рассеяния $\tau_{\text{A}3}(\lambda)$ существенно зависит от размеров и концентрации частиц аэрозоля, сосредоточенного в атмосфере и рассчитывается по данным [6, 13]:

$$k(\lambda, Z_1, Z_2, \beta) = \sec\beta \cdot 3{,}912 S_M^{-1} w'(\lambda) b^{-1}\left[\exp(-bZ_1) - \exp(-bZ_2)\right],$$

где $b = 2{,}78 - 0{,}461 g S_M(0)$; $k(\lambda, Z_1, Z_2, \beta)$ – показатель аэрозольного рассеяния; β – угол наклона трассы; S_M – метеорологическая дальность видимости; Z_1 и Z_2 – высота нижней и верхней границ атмосферного столба; $w'(\lambda) = \alpha(\lambda)\alpha(0{,}5)^{-1}$; $\alpha(\lambda)$, $\alpha(0{,}5)$ – коэффициенты ослабления на длине волны λ и 0,5 мкм, соответственно.

Таким образом, степень влияния атмосферно-оптического канала на качество формируемого изображения можно оценить функцией вида:

$$W_{\text{атм}}(N) = \tau_A(\lambda) W(N),$$

где

$$W(N) = \overline{W}_{TA}(N) W_{TA}(N, \Delta\lambda) W_{nc}(N).$$

Предложенное математическое описание модели атмосферы в процессе формирования изображений ИОЭС позволяет рассчитать оценки основных технических характеристик звена атмосферы: толщина пограничного слоя турбуленности, среднее квадратическое отклонение волнового фронта, удельная влажность воздуха, толщина слоя осажденной воды, упругость насыщенного водяного пара, точка росы водяного пара, показатель аэрозольного рассеяния, угол наклона трассы, метеорологическая дальность видимости, высота нижней и верхней границ атмосферного столба и использовать их в обобщенной структуре математической модели ИОЭС.

Список литературы

1. Захарченко А.Н., Веселов Ю.Г., Островский А.С., Сельвесюк Н.И. Метод оценки технического состояния цифровых оптико-электронных комплексов, адаптивный к условиям применения и решаемым задачам // Информатика и системы управления, 2015. № 2 (44). С. 33-44.

2. Молчанов А.С. Иконические системы воздушной разведки: основы построения, оценка качества и их применение в комплексах с беспилотными летательными аппаратами. Волгоград: Панорама, 2017. 216 с.

3. Веселов Ю.Г., Гулевич С.П., Молчанов А.С. Исследование линейности аэрофотосистем, построенных на основе фоточувствительных приборов с переносом заряда // Наука и образование, 2013. № 9. С. 313-324.

4. Чиров Д.С., Чертова О.Г., Потапчук Т.Н. Методика обоснования требований к системе технического зрения робототехнического комплекса // Труды СПИИРАН, 2017. № 2 (51). С. 152-176.

5. Труфанов И.В. Разработка методов комплексной обработки, дешифрирования изображений аэрокосмической разведки на основе теории некорректных задач. М., 2011. 131 с.

6. Зуев В.Е. Распространение видимых и инфракрасных волн в атмосфере. М.: Советское радио, 1970. 496 с.

7. Ларкин Е.В., Богомолов А.В., Горбачев Д.В., Привалов А.Н. Исследование критериев соответствия потока событий пуассоновскому потоку // Вестник компьютерных и информационных технологий, 2019. № 1. С. 3-11.

8. Рудаков И.С., Рудаков С.В., Богомолов А.В. Методика идентификации вида закона распределения параметров при проведения контроля состояния сложных систем // Информационно-измерительные и управляющие системы, 2007. Т. 5. № 1. С. 66-72.

9. Кукушкин Ю.А., Богомолов А.В., Ушаков И.Б. Математическое обеспечение оценивания состояния материальных систем // Информационные технологии, 2004. № 7 (приложение). 32 с.

10. Труфанов И.В. Задача сверхразрешения изображений и методы ее решения / под ред. И.Н. Белоглазова. М.: ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 2001. 188 с.

11. Алексеев В.И., Бондарский И.А. Разведывательное и светотехническое оборудование летательных аппаратов. М.: ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 1971. 128 с.

12. Оптическое зондирование атмосферной турбулентности / под ред. И.В. Самохвалова. Новосибирск: Наука, 1986. 96 с.

13. Зуев В.Е., Креков Г.М. Оптические модели атмосферы. Л.: Гидрометеоиздат, 1986. 256 с.

14. Passman S., Larmore L. Atmospheric Transmission, Santa Monica: Rand Paper, 1956. 897 p.

Чаусов Евгений Викторович, старший инженер-испытатель войсковой части, ewhenig@yandex.ru, Россия, Ахтубинск, Войсковая часть 15650,

Молчанов Андрей Сергеевич, канд. техн. наук, доцент, заместитель начальника отдела – начальник отделения (старший инженер-испытатель) войсковой части, andryoe@yandex.ru, Россия, Ахтубинск, Войсковая часть 15650

MATHEMATICAL MODEL OF THE ATMOSPHERE AS A LINK OF THE PROCESS OF FORMATION OF IMAGES OF ICONIC OPTICAL-ELECTRONIC SYSTEMS OF AIR EXPLORATION

E.V. Chausov, A.S. Molchanov

The developed mathematical model of the atmosphere is presented as a link in the process of image formation of iconic optical-electronic systems of aerial reconnaissance and the possibility of its application in the process of image formation and its use in a generalized mathematical model of an optical-electronic system is evaluated.

Key words: atmospheric model, optoelectronic system, iconic system, imaging, aerial reconnaissance system.

Chausov Evgeny Viktorovich, senior test engineer of military unit, ewhenig@yandex.ru, Russia, Akhtubinsk, Military unit 15650,

Molchanov Andrey Sergeevich, candidate of technical sciences, docent, deputy head of department - head of department (senior test engineer) of military unit, andryoe@yandex.ru, Russia, Akhtubinsk, Military unit 15650