

## ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС РАСЧЕТА АТМОСФЕРНЫХ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ АДАПТИВНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

<sup>1,2</sup>Д.В. Казаков, <sup>1,2</sup>Л.А. Больбасова, <sup>1</sup>В.П. Лукин

<sup>1</sup>Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия  
den-kazakov-1995@mail.ru, egorsh@vtomske.ru

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

## SOFTWARE PACKAGE FOR CALCULATING ATMOSPHERIC PARAMETERS FOR DESIGNING AN ADAPTIVE OPTICAL SYSTEM

<sup>1,2</sup>D.V. Kazakov, L.A. <sup>1,2</sup>Bolbasova, <sup>1</sup>V.P. Lukin

<sup>1</sup>V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Tomsk, Russia  
den-kazakov-1995@mail.ru, egorsh@vtomske.ru

<sup>2</sup>Tomsk State University, Tomsk, Russia

**Аннотация.** Представлен программный комплекс, выполняющий расчеты атмосферных параметров для проектирования адаптивных оптических систем (АОС), работающих сквозь атмосферную толщу. Он предназначен для расчета параметров датчика Шэка—Гартмана, радиуса Фрида для наклонных и вертикальных трасс, угла изопланатизма и оптической толщи эффективного турбулентного слоя на основе моделей высотной зависимости структурной характеристики показателя преломления атмосферы.

**Ключевые слова:** атмосфера, турбулентность, параметр Фрида, АОС.

**Abstract.** A software package is presented that performs calculations of atmospheric parameters for the design of adaptive optical systems (AOS) operating through the atmospheric thickness. The software package is designed to calculate the parameters of the Shack—Hartmann sensor, the Fried radius for inclined and vertical routes, the angle of isoplanatism, the optical thickness of the effective turbulent layer, based on models of the altitude dependence of structural characteristics of the refractive index of the atmosphere.

**Keywords:** atmosphere, turbulence, Fried parameter, AOS.

Данная работа, посвящена реализации программного комплекса расчета атмосферных параметров для проектирования адаптивных оптических систем (АОС).

Целью данной работы является автоматизировать процесс расчета параметров датчика Шэка—Гартмана, радиуса Фрида для наклонных и вертикальных трасс, угла изопланатизма и оптической толщи эффективного турбулентного слоя.

Сегодня в любой астрономической обсерватории АОС является важнейшим инструментом и представляет специальную систему адаптивной оптической коррекции искажений оптического излучения [Гурвич и др., 1976]. Элементами фазосопряженной системы адаптивной оптики (АО) являются устройства, регистрирующие искажения лазерного излучения (датчик волнового фронта); устройство, корректирующее эти искажения (адаптивное зеркало), и вычислительное устройство с алгоритмами управления системой [Лукин, 2014].

Фазосопряженная система АО, как правило, включает в себя датчик волнового фронта (ДВФ) Шэка—Гартмана, который является наиболее приемлемым. Его оптическая часть включает в себя линзовый растр и видеокамеру, совместное действие которых генерирует в плоскости регистрации матрицу из фокальных пятен или гартманограмму. Алгоритмическая часть датчика рассчитывает координаты энергетических центров тяжести каждого из фокальных пятен (координаты центроидов).

В связи с интенсивным применением оптико-электронных систем передачи информации, узконаправленной транспортировки энергии электромаг-

нитного излучения, формирования изображения в реальных условиях актуально развитие методов и устройств коррекции лазерного излучения, в том числе АОС, которые представляют собой один из самых радикальных способов уменьшения вредного влияния турбулентной атмосферы.

Поскольку характеристики АОС в определяющей степени зависят от атмосферных условий, а именно интенсивности и распределения турбулентных флуктуаций, каждая АОС проектируется под условия турбулентных слоев атмосферы конкретного места.

Одним из основных параметров турбулентной атмосферы является структурная характеристика флуктуаций показателя преломления. Ее величина влияет на все статистические характеристики оптического излучения в атмосфере. Поэтому знание высотных зависимостей структурной характеристики  $C_n^2(h)$  в месте расположения астрономического телескопа наземного базирования имеет ключевое значение при проектировании АОС.

К настоящему времени предложен ряд моделей высотной зависимости структурной характеристики показателя преломления атмосферы, которые были получены на основе статистического обобщения экспериментальных данных. Ниже представлены модели:

1. Модель Гринвуда, которая имеет достаточно простой вид:

$$C_n^2(\xi) = \left[ 2.2 \cdot 10^{-13} (\xi + 10)^{-1.3} + 4.3 \cdot 10^{-17} \right] \exp(\xi / 4000), \quad (1)$$

где  $\xi$  [м] — высота над уровнем моря

2. Модель Хафнагеля—Волли

$$C_n^2(\xi) = A \exp\left(-\frac{\xi}{100}\right) + 5.94 \cdot 10^{-53} \left(\frac{v}{27}\right)^2 \xi^{10} \exp\left(-\frac{\xi}{1000}\right) + 2.7 \cdot 10^{-16} \exp\left(-\frac{\xi}{1500}\right), \quad (2)$$

где  $\xi$  [м] — высота над уровнем моря,  $A$  —  $C_n^2(0)$  у земли в  $m^{-2/3}$  и  $v$  [м/с] — псевдоскорость ветра, которая определяется как

$$v = \left[ \frac{1}{15 \cdot 10^3} \int_{5 \cdot 10^3}^{20 \cdot 10^3} V_n^2(\xi) d\xi \right]^{1/2}, \quad (3)$$

где  $V_n^2(\xi)$  — временные характеристики турбулентности, которые описываются моделью скорости ветра Бафтона

$$V_n^2(\xi) = v_g + 30 \exp\left\{-\left[\frac{\xi - 9400}{8400}\right]^2\right\}. \quad (4)$$

Скорость ветра у земной поверхности обычно полагают равной  $v_g = 5$  м/с.

При подстановке различных значений высоты  $A$  у земли и псевдоскорости ветра  $v$  были получены модификации этой модели для различных обсерваторий, таких как U.S. Air Force Maui Optical Site (AMOS) на острове Мауи, а также для обсерватории Мауна Кеа, расположенной на Гавайских островах [Бельбасова, Лукин, 2012].

На основе моделей высотной зависимости структурной характеристики показателя преломления атмосферы мы можем рассчитать следующие параметры, необходимые для проектирования АОС:

1. Радиус Фрида для наклонных и вертикальных трасс:

$$r_0^{\text{пл}} = \left\{ 0.423 k^2 \int_0^x d\xi C_n^2(\xi) \right\}^{-3/5}, \quad (5)$$

$$r_0^{\text{сф}} = \left\{ 0.423 \int_0^x d\xi (1 - \xi/x)^{5/3} C_n^2(\xi) \right\}^{-3/5}, \quad (6)$$

где  $k^2$  — волновое число  $k^2 = 2\pi/\lambda$ ,  $\xi$  [м] — высота над уровнем моря.

2. Угол изопланатизма

$$\theta_0 = 0.314 r_0 / h_\xi, \quad (7)$$

где  $r_0$  — радиус когерентности,  $h_\xi$  — толщина эффективного турбулентного слоя.

3. Толщина эффективного турбулентного слоя

$$h_\xi = \int_0^\infty d\xi \xi C_n^2(\xi) / \int_0^\infty d\xi C_n^2(\xi). \quad (8)$$

4. Эффективный фокус для растра в ДВФ Шэка—Гартмана

$$F = \frac{d_s^2}{2.44\lambda} \left[ 1 + 1.03 \left( \frac{r_0}{d_s} \right)^{1/6} \right]^{-1}, \quad (9)$$

где  $d_s$  — размер субапертуры на сенсоре камеры,  $\lambda$  — длина волны.

Данный программный комплекс предназначен для автоматизации процесса расчета атмосферных параметров, что позволит сократить время проектирования АОС.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

- Гурвич А.С., Кон А.И., Миронов В.Л., Хмелевцов С.С. *Лазерное излучение в турбулентной атмосфере*. М.: Наука, 1976. 273 с.
- Лукин В.П. Формирование оптических пучков и изображений на основе применения систем адаптивной оптики. *Успехи физических наук*. 2014. Т. 184, № 16. С. 599–640.
- Бельбасова Л.А., Лукин В.П. Адаптивная коррекция атмосферных искажений оптических изображений на основе искусственного опорного источника. М.: Физико-математическая литература, 2012. 125 с.
- Бельбасова Л.А., Лукин В.П. Вопросы измерения наклона волнового фронта. *Оптический журнал*. 2021. Т. 88, № 11. С. 16–23. DOI: [10.17586/1023-5086-2021-88-11-16-23](https://doi.org/10.17586/1023-5086-2021-88-11-16-23).