

В.П. Кандидов, М.П. Тамаров, С.С. Чесноков, С.А. Шленов

## КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ ПРОТЯЖЕННОГО ОБЪЕКТА В ТУРБУЛЕНТНОЙ АТМОСФЕРЕ. ЧАСТЬ III. ОЦЕНКА КАЧЕСТВА

Статья завершает цикл работ, посвященных прямому компьютерному моделированию случайных реализаций короткоэкспозиционных изображений протяженного объекта в турбулентной атмосфере. Сформулированный здесь критерий их качества или, наоборот, степени деградации может быть использован как целевая функция управления волновым фронтом в адаптивных оптических системах формирования изображения.

Разработка критериев качества изображения протяженных объектов, расположенных в толще земной атмосферы, представляет большой практический интерес. Такие критерии могут служить для экспресс-оценки эффективности адаптивной компенсации атмосферных искажений в системах формирования изображений. Поскольку характерные времена заморозки флуктуаций показателя преломления в атмосфере обычно невелики, весьма актуальной при расчете критериев является проблема уменьшения вычислительных затрат.

В настоящей статье предлагается критерий, позволяющий оценить качество, или наоборот, степень деградации короткоэкспозиционного изображения некогерентно освещенного объекта. Изображение представляет собой случайную реализацию двухмерного распределения интенсивности светового поля, заданного в узлах расчетной сетки (см. ч. I [1] и II (с. 517–521) данного номера журнала). При этом предполагается, что какая-либо априорная информация об объекте отсутствует. В связи с этим центральной задачей является восстановление изображения, т.е. получение «неискаженного изображения», в сравнении с которым оценивается качество каждой реализации. Следует заметить, что методы восстановления изображения по искаженному образцу и построения количественного критерия качества для реализации изображения неоднозначны; их обсуждению посвящена обширная литература (см., например, [2–6]). Эффективность вводимых критериев качества существенно зависит от конкретной области их приложений, поэтому предлагаемый здесь подход можно рассматривать как один из множества альтернативных.

## 1. Восстановление изображения

В отсутствие априорной информации получение восстановленного изображения должно основываться на обработке случайной реализации с учетом характеристик оптической системы и атмосферной трассы. Предлагаемый метод обработки ориентирован на изложенную в [1] и в разд. 2 настоящей статьи модель формирования изображения. В этой модели искаже-

ния короткоэкспозиционного изображения  $\tilde{I}(\mathbf{r}, t)$  включают три составных компонента:

- дифракционное размытие,
- размытие, вызванное усредненным вкладом мелкомасштабных атмосферных неоднородностей,
- блуждание изображения и искажение его контура, связанные с крупномасштабными атмосферными флуктуациями.

Попытка построить восстановленное изображение, свободное от всех трех указанных компонент, не имеет смысла. Средствами адаптивной оптики компенсируются атмосферные искажения, тогда как для достижения разрешения, превышающего дифракционное, используется обычно последующая математическая обработка изображения. Поэтому при построении восстановленного изображения  $I_r(\mathbf{r})$  предпринимается попытка получить дифракционно ограниченное изображение  $I_0(\mathbf{r})$  некогерентной системы по реализациям искаженного короткоэкспозиционного изображения  $\tilde{I}(\mathbf{r}, t)$ .

Для исключения вклада крупномасштабной атмосферной турбулентности воспользуемся процедурой усреднения короткоэкспозиционного изображения  $\tilde{I}(\mathbf{r}, t)$  по конечному числу реализаций  $\tilde{I}_\mu(\mathbf{r}) = \tilde{I}(\mathbf{r}, t_\mu)$ :

$$\langle I(\mathbf{r}) \rangle = \frac{1}{M} \sum_{\mu=1}^M \tilde{I}_\mu(\mathbf{r}). \quad (1)$$

При бесконечном  $M$  данная процедура эквивалентна получению длинноэкспозиционного изображения  $I_L(\mathbf{r})$  с временем регистрации  $\tau_{\text{exp}}$ , превышающим характерное время существования крупномасштабных неоднородностей  $\tau_L$ . При конечном  $M$  усредненное изображение  $\langle I(\mathbf{r}) \rangle$  близко к длинноэкспозиционному  $I_L(\mathbf{r})$ :

$$\langle I(\mathbf{r}) \rangle \cong I_L(\mathbf{r}). \quad (2)$$

Определим спектры длинноэкспозиционного изображения  $G_L(\mathbf{\Omega})$  и усредненного  $G_{\langle I \rangle}(\mathbf{\Omega})$ :

$$G_L(\mathbf{\Omega}) = F\{I_L(\mathbf{r})\}, \quad G_{\langle I \rangle}(\mathbf{\Omega}) = F\{\langle I(\mathbf{r}) \rangle\}. \quad (3)$$

Здесь  $\Omega$  – пространственная частота;  $F$  – оператор преобразования Фурье. Согласно (2) спектр усредненного изображения  $G_0(\Omega)$  близок к спектру длинноэкспозиционного  $G_L(\Omega)$ :

$$G_{(\square)}(\Omega) \cong G_L(\Omega). \quad (4)$$

Длинноэкспозиционное изображение  $I_L(\mathbf{r})$  искажено размытием, обусловленным как дифракцией, так и усредненным вкладом атмосферных флуктуаций различных масштабов. Его спектр  $G_L(\Omega)$  равен произведению спектра объекта  $G(\Omega)$  и ОПФ  $H_{0L}(\Omega)$  оптической некогерентной системы при длительной экспозиции:

$$G_L(\Omega) = G(\Omega) \times H_{0L}(\Omega). \quad (5)$$

Согласно [6] ОПФ  $H_{0L}(\Omega)$  равна

$$H_{0L}(\Omega) = H_0(\Omega) \times H_L(\Omega), \quad (6)$$

где  $H_0(\Omega)$  – ОПФ дифракционно ограниченной некогерентной системы; ОПФ  $H_L(\Omega)$  отражает вклад атмосферных неоднородностей при длительной экспозиции. В случае колмогоровского спектра флуктуаций показателя преломления выражение для  $H_L(\Omega)$  имеет вид [7]:

$$H_L(\Omega) = \exp \left\{ -3,44(\lambda\Omega/r_0)^{5/3} \right\}, \quad (7)$$

где

$$r_0 = 0,185 \left[ \lambda^2 / (C_n^2 z) \right]^{3/5} \quad (8)$$

– радиус Фрида. Спектр изображения в дифракционно ограниченной системе  $G_0(\Omega)$  равен

$$G_0(\Omega) = G(\Omega) H_0(\Omega). \quad (9)$$

Из (5), (6) следует, что по известному спектру  $G_L(\Omega)$  длинноэкспозиционного изображения можно вычислить спектр  $G_0(\Omega)$  изображения для дифракционно ограниченной системы, если известна ОПФ  $H_L(\Omega)$ :

$$G_0(\Omega) = G_L(\Omega) \times H_L^{-1}(\Omega). \quad (10)$$

Отсюда дифракционно ограниченное изображение равно

$$I_0(\mathbf{r}) = F^{-1} \{ G_L(\Omega) \times H_L^{-1}(\Omega) \}. \quad (11)$$

Заменяя в (11) спектр длинноэкспозиционного изображения  $G_L(\Omega)$  на близкий ему спектр усредненного  $G_0(\Omega)$  (см. (4)), получим восстановленное изображение:

$$I_r(\mathbf{r}) = F^{-1} \{ G_{(\square)}(\Omega) \times H_L^{-1}(\Omega) \}. \quad (12)$$

Окончательно, используя (1), (3), найдем восстановленное изображение  $I_r(\mathbf{r})$  в виде

$$I_r(\mathbf{r}) = F^{-1} \left\{ F \left\{ \frac{1}{M} \sum_{\mu=1}^M \tilde{I}_\mu(\mathbf{r}) \right\} \times H_L^{-1}(\Omega) \right\}. \quad (13)$$

Следует заметить, что восстановленное изображение  $I_r(\mathbf{r})$  не совпадает с дифракционно ограниченным  $I_0(\mathbf{r})$ . Действительно, процедура восстановления выполнена в рамках аналитической теории [7], справедливость которой не подтверждена экспериментально. Эта теория построена для колмогоровского спектра атмосферной турбулентности, справедливого лишь в инерционном интервале. В реальных условиях радиус Фрида  $r_0$ , характеризующий атмосферные искажения, может значительно меняться во время работы адаптивной системы. Для его определения необходимы независимые измерения параметров турбулентности. Восстановленное изображение  $I_r(\mathbf{r})$  вычисляется по усредненному спектру  $G_{(\square)}(\Omega)$ , который близок, но не совпадает со спектром  $G_L(\Omega)$  длинноэкспозиционного изображения  $I_L(\mathbf{r})$ . С увеличением объема выборки  $M$  отклонение спектра  $G_{(\square)}(\Omega)$  от  $G_L(\Omega)$  должно уменьшаться. Однако с ростом  $M$  увеличивается и время восстановления изображения. На основании тестовых расчетов установлено, что в широком диапазоне параметров задачи близкий к оптимальному объем выборки составляет  $M = 5$ .

## 2. Критерий качества

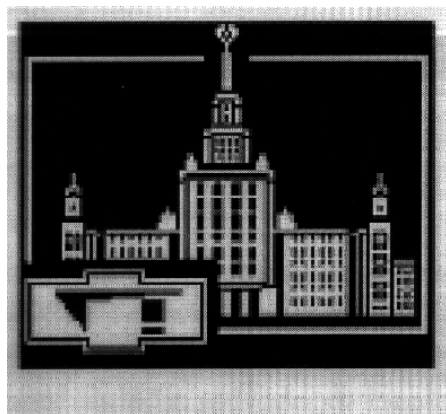
Для вычисления количественного критерия качества  $\tilde{J}_\mu$  случайной реализации изображения предлагается использовать относительную величину среднеквадратического отклонения распределения интенсивности в этой реализации  $\tilde{I}_\mu(\mathbf{r})$  от восстановленного изображения  $I_r(\mathbf{r})$ :

$$\tilde{J}_\mu = \frac{\int |\tilde{I}_\mu(\mathbf{r}) - I_r(\mathbf{r})|^2 d^2\mathbf{r}}{\int I_r(\mathbf{r})^2 d^2\mathbf{r}} \cdot 100\%. \quad (14)$$

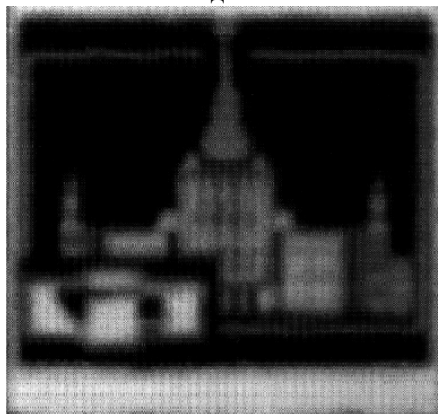
Величина  $\tilde{J}_\mu$  характеризует степень деградации изображения. Из определения  $\tilde{J}_\mu$  следует, что для реализации  $\tilde{I}_\mu(\mathbf{r})$ , «неискаженной» в том смысле, что она совпадает с восстановленным изображением  $I_r(\mathbf{r})$ , критерий деградации  $\tilde{J}_\mu$  равен нулю. Наоборот, для реализации с нулевой интенсивностью – черного поля – деградация  $\tilde{J}_\mu$  равна 100%.

Пример использования развиваемого алгоритма проиллюстрирован на рисунке для одного из тест-объектов – эмблемы МГУ. Видно достаточно высо-

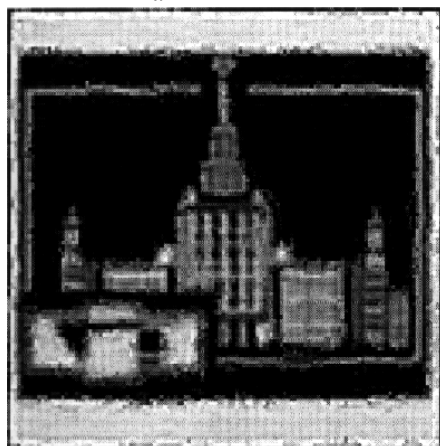
кое качество восстановленного изображения, в котором в значительной степени удалось устранить долгоэкспозиционное размытие. В этих условиях критерий  $\tilde{J}_\mu$  действительно характеризуют короткоэкспозиционное размытие изображения, случайное смещение и искажения его контура.



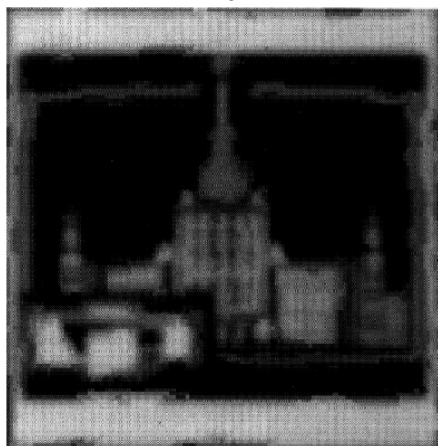
*a*



*б*



*в*



*г*

Пример использования алгоритма оценки деградации изображений: *a* – объект; *б* – усредненное по  $M = 5$  реализациям изображение; *в* – восстановленное изображение; *г* – реализация короткоэкспозиционного изображения с критерием деградации  $\tilde{J}_\mu = 16,75\%$ . Условия численного эксперимента:  $\lambda = 0,5$  мкм,  $C_n^2 = 5 \cdot 10^{-16} \text{ см}^{-2/3}$ , размер объекта  $L = 64$  см, диаметр линзы  $d = 10$  см, длина трассы  $z = 2$  км, размерность сетки  $128 \times 128$

1. Кандидов В.П., Чесноков С.С., Шленов С.А. Компьютерное моделирование формирования изображения протяженного объекта в турбулентной атмосфере. Ч. I. 1998. N 4. С. 401–405.
2. О'Нейл Э. Введение в статистическую оптику. М.: Мир, 1966. 254 с.
3. Гудмен Дж. Введение в Фурье-оптику. М.: Мир, 1970. 364 с.

4. Василенко Г.И., Тараторкин А.М. Восстановление изображений. М.: Радио и связь, 1986. 304 с.
5. Токовинин А.А. Звездные интерферометры. М.: Наука, 1988. 160 с.
6. Бьмон Ж., Лагендейк Л., Мерсеро Р.М.//ТИИЭР. 1990. Т. 78. N 5. С. 58 – 84.
7. Гудмен Дж. Статистическая оптика. М.: Мир, 1988. 527 с.

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова  
Международный учебно-научный лазерный центр

Поступила в редакцию  
13 мая 1997 г.

*V.P. Kandidov, M.P. Tamarov, S.S. Chesnokov, S.A. Shlenov. Computer Simulation of Imaging of Extended Object Through Turbulent Atmosphere. Part III. Quality Estimation.*

This article completes a series of papers devoted to direct computer simulation of random realizations of short exposure images of an extended object in the turbulent atmosphere. Formulated here is the criterion of image quality or, on the contrary, image degradation. It may be used as objective function of wavefront control in imaging adaptive systems.