

МЕТОДЫ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ. ОБРАБОТКА ДАННЫХ
ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

УДК 551.521

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

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ
ПРОТЯЖЕННОГО ОБЪЕКТА В ТУРБУЛЕНТНОЙ АТМОСФЕРЕ.
ЧАСТЬ II. АЛГОРИТМ, ПРИМЕРЫ

На основе метода, развитого в [1], построен алгоритм прямого компьютерного моделирования случайных реализаций изображения некогерентно освещенного объекта, наблюдаемого через атмосферный слой. Алгоритм может найти применение при разработке и тестировании методов обработки изображений, моделировании адаптивных систем коррекции изображений и в других задачах.

Построенная в [1] модель переноса изображения соответствует анизопланатной системе, характерной для задач видения в турбулентной атмосфере. Очевидно, что для таких систем нельзя ввести оптическую передаточную функцию (ОПФ), поскольку каждый фрагмент изображения протяженного объекта искажается иначе, чем другие. Поэтому алгоритм получения реализации короткоэкспозиционного изображения предлагается основывать на интеграле суперпозиции случайных короткоэкспозиционных функций размытия точки (ФРТ) $\tilde{S}_{\text{exp}}(\mathbf{r}, \mathbf{r}', \eta)$. Как показано в [1], ФРТ $\tilde{S}_{\text{exp}}(\mathbf{r}, \mathbf{r}', \eta)$ представима в виде $\tilde{S}_{\text{exp}}(\mathbf{r}, \mathbf{r}', \eta) = S_{0s}(\mathbf{r} - \xi - \tilde{\xi}(\mathbf{r}', \eta))$, где ФРТ S_{0s} описывает размытие вследствие дифракции и усредненного вклада мелкомасштабных флуктуаций, а случайные смещения $\tilde{\xi}(\mathbf{r}', \eta)$ центров размытых точек от их геометрооптических положений $\xi(\mathbf{r}') = -M\mathbf{r}'$ определяются крупномасштабными флуктуациями.

1. Алгоритм компьютерного моделирования случайной реализации изображения

В соответствии с изложенным выше развиваемый алгоритм включает следующие основные этапы:

1. Вычисление ФРТ $S_{0s}(\mathbf{r} - \xi)$, определяющей размытие изображения точки вследствие дифракции и усредненного вклада мелкомасштабных флуктуаций для заданных параметров атмосферной трассы и формирующей оптики. Для этого используется свойство изопланатности подсистемы с усредненной ФРТ, согласно которому $S_{0s}(\mathbf{r})$ есть результат обратного преобразования Фурье от ОПФ этой подсистемы: $S_{0s}(\mathbf{r}) = F^{-1}\{H_{0s}(\mathbf{\Omega})\}$.

2. Определение случайных смещений изображений точек объекта $\tilde{\xi}(\mathbf{r}', \eta)$ на основе модели одиночного фазового экрана.

3. Вычисление случайного распределения интенсивности изображения $\tilde{I}(\mathbf{r})$, которое является суперпозицией ФРТ $S_{0s}(\mathbf{r})$, взятых с весами интенсивности точек $I(\mathbf{r}')$ и смещенных на случайную величину $\tilde{\xi}(\mathbf{r}', \eta)$ от геометрооптического положения изображения этих точек $\xi(\mathbf{r}')$.

2. Случайные смещения точек объекта

Определение случайных смещений $\tilde{\xi}(\mathbf{r}', \eta)$ изображений точек объекта основывается на модели уединенного фазового экрана для турбулентной атмосферы. Вычисляется наклон волнового фронта $\tilde{\theta}(\mathbf{r}', \eta)$, который вносится областью фазового экрана, определяющей формирование изображения точки \mathbf{r}' объекта. Такая область выделяется конусом с вершиной в точке \mathbf{r}' объекта и основанием, совпадающим с апертурой линзы диаметра d (рис. 1,а). Наклон волнового фронта $\tilde{\theta}(\mathbf{r}', \eta)$ является случайной функцией координаты \mathbf{r}' (рис. 1,б). Корреляционная функция наклонов $\langle \tilde{\theta}(\mathbf{r}') \tilde{\theta}(\mathbf{r}' + \delta\mathbf{r}') \rangle$ определяется статистическими свойствами фазового экрана, имитирующего атмосферную турбулентность. При наблюдении статистически независимых короткоэкспозиционных реализаций изображения наклон $\tilde{\theta}(\mathbf{r}')$ удовлетворяет условию

$$\langle \tilde{\theta}_j(\mathbf{r}') \tilde{\theta}_{j'}(\mathbf{r}') \rangle = \sigma_{\theta}^2 \delta_{jj'}, \quad (1)$$

где j, j' – номера реализаций; σ_{θ}^2 – дисперсия наклонов волнового фронта.

В случае движущегося фазового экрана, имитирующего ветровой снос турбулентности, наклон $\tilde{\theta}(\mathbf{r}', \eta)$ зависит случайным образом также от медленного времени η . В соответствии с гипотезой «за-

мороженной» турбулентности для наклона $\tilde{\theta}(\mathbf{r}', \eta)$ справедливо соотношение

$$\tilde{\theta}(\mathbf{r}', \eta + \eta_0) = \tilde{\theta}[\mathbf{r}' - (V/2)\eta_0, \eta]. \quad (2)$$

Тем самым задается пространственно-временная корреляция наклонов волнового фронта для различных точек объекта.

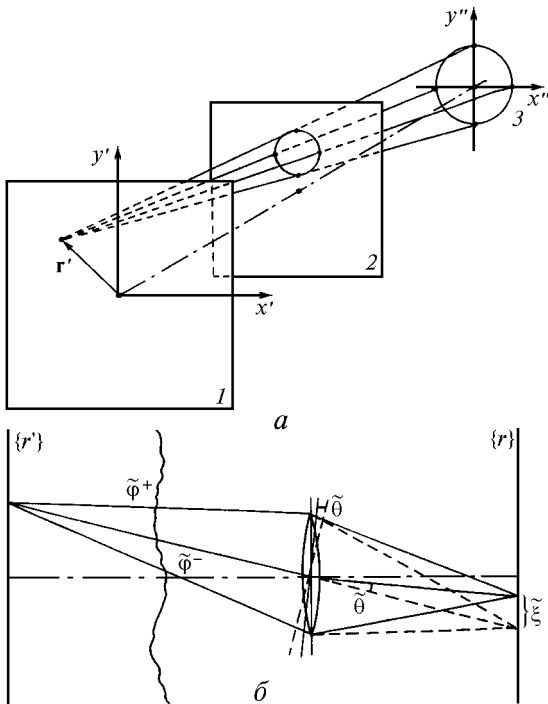


Рис. 1. Определение случайных смещений точек объекта: *a* – область фазового экрана, влияющая на положение изображения точки; *b* – вычисление случайного наклона $\tilde{\theta}$ и смещения $\tilde{\xi}$ для изображения точки; φ^+ , φ^- – значения флуктуаций фазы на концах диаметра области фазового экрана

Наклон $\tilde{\theta}(\mathbf{r}', \eta)$ определяется двумя компонентами $\tilde{\theta}_x(\mathbf{r}', \eta)$ и $\tilde{\theta}_y(\mathbf{r}', \eta)$ в плоскостях XOZ и YOZ соответственно. Поскольку диаметр области d много меньше характерного размера крупномасштабных неоднородностей, то компоненты $\tilde{\theta}_x$ и $\tilde{\theta}_y$ можно вычислить как отношения разности фаз на границах выделяемой области к $d/2$ (см. рис. 1, *b*):

$$\tilde{\theta}_x = \frac{\tilde{\varphi}_x^+(\mathbf{r}', \eta) - \tilde{\varphi}_x^-(\mathbf{r}', \eta)}{k d/2},$$

$$\tilde{\theta}_y = \frac{\tilde{\varphi}_y^+(\mathbf{r}', \eta) - \tilde{\varphi}_y^-(\mathbf{r}', \eta)}{k d/2}. \quad (3)$$

Здесь $k = 2\pi/\lambda$; $\tilde{\varphi}_x^+$, $\tilde{\varphi}_x^-$ – значения флуктуаций фазы на диаметре выделяемой области, параллельном плоскости XOZ , а $\tilde{\varphi}_y^+$, $\tilde{\varphi}_y^-$ – на диаметре, параллельном YOZ .

Компоненты $\tilde{\xi}_x(\mathbf{r}', \eta)$ и $\tilde{\xi}_y(\mathbf{r}', \eta)$ вектора случайного смещения $\tilde{\xi}(\mathbf{r}', \eta)$ изображения точки с координатой \mathbf{r}' равны:

$$\tilde{\xi}_x(\mathbf{r}', \eta) = \tilde{\theta}_x(\mathbf{r}', \eta) f,$$

$$\tilde{\xi}_y(\mathbf{r}', \eta) = \tilde{\theta}_y(\mathbf{r}', \eta) f. \quad (4)$$

3. Сетка в плоскости объекта

При компьютерном моделировании двумерные поля интенсивности объекта $I(\mathbf{r}')$ и изображения $\tilde{I}(\mathbf{r})$, фазовых флуктуаций $\tilde{\varphi}$, угловых $\tilde{\theta}(\mathbf{r}', \eta)$ и пространственных $\tilde{\xi}(\mathbf{r}', \eta)$ смещений представляются на дискретных сетках в соответствующих плоскостях, перпендикулярных оси OZ . Выбор оптимальных параметров этих сеток, в первую очередь шага дискретизации h , является определяющим в создании эффективного компьютерного кода для построения изображения.

Для оценки шага h' сетки в плоскости $\{\mathbf{r}'\}$ воспользуемся свойствами дифракционно ограниченной некогерентной оптической системы. ОПФ $H_0(\Omega)$ и ФРТ $S_0(\vartheta)$ такой системы [2] изображены на рис. 2, где через Ω_0 обозначена частота обрезания некогерентной оптической системы, ϑ_0 – угловая ширина ФРТ. Для ϑ_0 и линейной ширины ФРТ в плоскости объекта Δr_0 справедливо

$$\vartheta_0 = \lambda/d, \quad \Delta r_0 = z \vartheta_0. \quad (5)$$

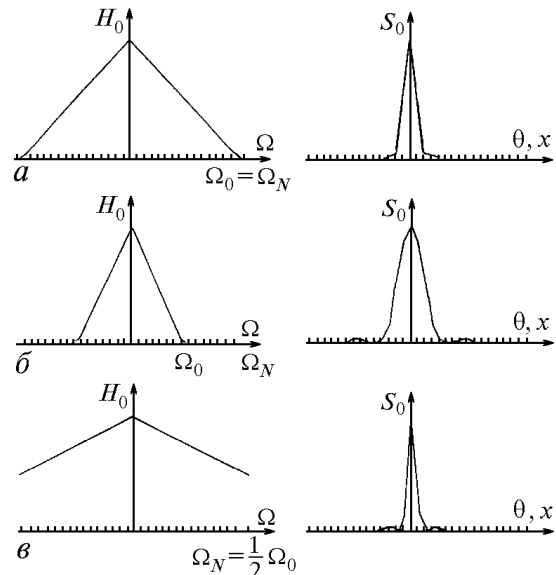


Рис. 2. ОПФ $H_0(\Omega)$ и ФРТ $S_0(x)$ дифракционно ограниченной некогерентной оптической системы, представленные на расчетной сетке; $x = \vartheta f$; Ω_N – частота Найквиста сетки, Ω_0 – частота обрезания оптической системы; *a* – оптимальная сетка при $\Omega_N = \Omega_0$; *b* – избыточная сетка при $\Omega_N > \Omega_0$; *в* – сетка, не воспроизводящая дифракционное размытие при $\Omega_N < \Omega_0$

Сетке в плоскости объекта $\{\mathbf{r}'\}$ с шагом h' соответствует угловой шаг

$$\Delta\vartheta = h'/z. \quad (6)$$

Частота Найквиста Ω_N для нее равна

$$\Omega_N = 1/(2\Delta\vartheta). \quad (7)$$

Согласно теореме отсчетов [3], функция с ограниченным спектром полуширины Ω_0 точно воспроизводится на сетке, если ее частота Найквиста удовлетворяет условию

$$\Omega_N \geq \Omega_0. \quad (8)$$

Знак неравенства в (8) соответствует избыточной сетке, для которой ОПФ и ФРТ изображены на рис. 2,б. При ограниченном числе узлов сетки оптимальной является сетка с частотой Найквиста $\Omega_N = \Omega_0$. Отсюда оптимальный шаг по углу равен

$$\Delta\vartheta_{opt} = \lambda/(2d). \quad (9)$$

Для оптимальной сетки ОПФ $H_0(\Omega)$ и ФРТ $S_0(\vartheta)$ изображены на рис. 2,а.

В условиях мелкомасштабных флуктуаций фазы частота обрезания Ω_0 некогерентной оптической системы не возрастает и условие (8) не нарушается. В соответствии с этим ФРТ системы $S_{0s}(\theta)$ не может стать уже за счет усредненного вклада мелкомасштабных флуктуаций.

На сетке с угловым шагом $\Delta\vartheta < \Delta\vartheta_{opt}$ и, следовательно, частотой Найквиста $\Omega_N < \Omega_0$ дифракционное размытие точки не воспроизводится адекватно. В частности, при $\Delta\vartheta = 2\Delta\vartheta_{opt}$ или $\Omega_N = 0,5\Omega_0$ дифракционное размытие исчезает (рис. 2,в).

4. Иллюстрация алгоритма

Изложенный алгоритм проиллюстрирован на рис. 3, 4, где представлены отдельные реализации короткоэкспозиционных изображений и усредненные по $M=20$ реализациям независимых фазовых экранов «долгоэкспозиционные» изображения тестовых объектов. Результаты получены на сетке 128×128 с оптимальным шагом.

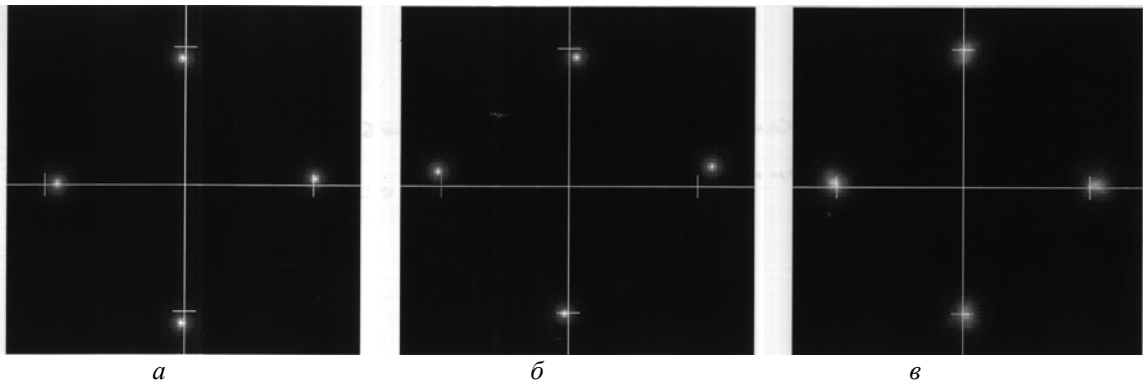


Рис. 3. Изображение тест-объекта из четырех светящихся точек, наблюдаемого через турбулентную атмосферу: а, б – две реализации короткоэкспозиционных изображений; в – усредненное по 20 реализациям изображение. Геометрооптические положения изображений точек помечены насечками на координатных осях. Условия численного эксперимента: $\lambda = 0,5$ мкм, $C_n^2 = 5 \cdot 10^{-16}$ см⁻²³, $L = 64$ см, $d = 10$ см, $z = 2$ км, размерность сетки 128×128 , шаг сетки в плоскости объекта $h' = 0,5$ см

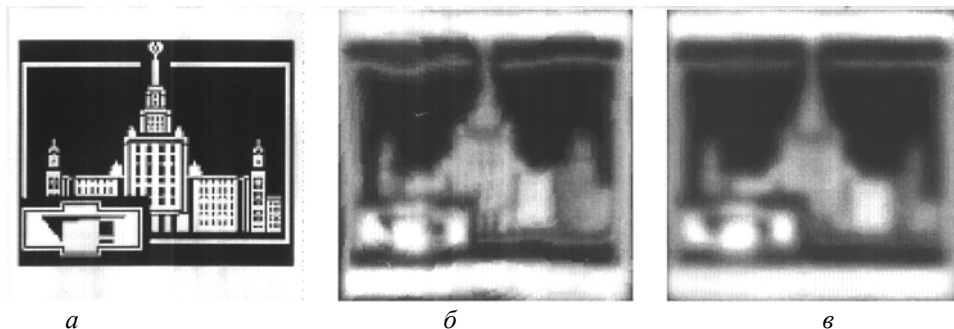


Рис. 4. Иллюстрация алгоритма моделирования искажений изображения: а – объект; б – одна реализация короткоэкспозиционного изображения; в – усредненное по 20 реализациям изображение. Условия численного эксперимента те же, что на рис. 3

Рис. 3 демонстрирует изображения точек объекта, представляющего собой четыре точечных источника, расположенных в вершинах квадрата. Отчетливо видно, что изображения точек размыты ди-

фракцией и мелкомасштабными неоднородностями одинаково, но в каждой реализации крупномасштабных неоднородностей они смещаются независимо друг от друга. Центры усредненных изображений

близки к геометрическим изображениям точек объекта.

Представление о возможностях алгоритма при моделировании изображения сложного двумерного объекта (эмблемы МГУ), наблюдаемого через двухкилометровый атмосферный слой, можно наглядно получить из рис. 4.

5. Эффективный радиус Фрида

Как уже упоминалось, основная идея развиваемой модели состоит в том, что влияние мелкомасштабной турбулентности описывается усредненной ОПФ $H_{0S}(\Omega)$, в то время как крупномасштабные неоднородности моделируются посредством генерации фазовых экранов с последующим выделением случайных наклонов волнового фронта. Такой подход обеспечивает учет широкого спектра флуктуаций показателя преломления в рамках единой задачи, однако требует согласования параметров обеих составных частей модели переноса изображения. Основным параметром, характеризующим усредненное размытие изображений мелкомасштабной турбулентностью, является радиус Фрида r_0 , входящий в выражения (15), (23) из [1]. Чтобы согласовать обе части модели, найдем эффективный радиус Фрида r_{ef} для усредненных искажений, вносимых фазовым экраном. При этом воспользуемся параметрическим выражением для длинноэкспозиционной ОПФ $H_L(\Omega)$:

$$H_L(\Omega) = \exp \{ -3,44 (\lambda\Omega/r_{ef})^c \}. \quad (10)$$

Здесь показатель степени c и эффективный радиус r_{ef} – неизвестные константы. Чтобы найти их, используем метод фазового экрана и выполним серию численных экспериментов по определению средней ОПФ $H_L(\Omega)$. При этом мы будем предполагать, что основной вклад в искажения вносят случайные наклоны волнового фронта на апертуре линзы.

В численных экспериментах многократно генерировались реализации случайных фазовых экранов по заданным параметрам атмосферной турбулентности. Для каждого фазового экрана на равномерной сетке точек на объекте размером L осуществлялся

расчет разности фаз $\Delta\tilde{\varphi}_i$ на диаметре выделяемой области. По формуле

$$\tilde{\theta}_i = [\lambda/(2\pi d)] \Delta\tilde{\varphi}_i \quad (11)$$

определялось случайное отклонение $\tilde{\theta}_i$ угла наклона волнового фронта за линзой. Гистограмма полученных угловых отклонений $\tilde{\theta}_i$ интерпретировалась как усредненная длинноэкспозиционная ФРТ $S_L(\mathbf{r})$. Длинноэкспозиционная ОПФ $H_L(\Omega)$ получалась из $S_L(\mathbf{r})$ преобразованием Фурье. Затем методом наименьших квадратов определялись параметры c и r_{ef} модельной ОПФ. Серия численных экспериментов

по определению эффективного радиуса Фрида при различных параметрах атмосферной турбулентности была выполнена на сетке с числом узлов $N \times N = 128 \times 128$, диаметр линзы составлял $d = 5$ см, размер объекта $L = 5$ м. В каждом численном эксперименте число реализаций составляло $M = 10$ независимых фазовых экранов. Использовалась колмогоровская модель атмосферной турбулентности.

Следует отметить, что показатель степени c практически не отличается от значения $c \approx 2$. Это отражает тот факт, что при расчете ФРТ учитывались только наклоны волнового фронта. Установлена слабая зависимость r_{ef} от диаметра линзы d и размера сетки N . Так, при изменении диаметра линзы d от 1 до 50 см, т.е. в 50 раз, параметр r_{ef} меняется не более чем на 50 %. Это обстоятельство позволило ограничиться одним значением r_{ef} .

С ростом числа узлов расчетной сетки на фазовом экране наблюдается тенденция к уменьшению разности между значениями r_{ef} и r_0 . Это связано с лучшим воспроизведением структуры атмосферной турбулентности на фазовых экранах с большим числом узлов. Однако, как показали численные эксперименты, на часто используемых на практике сетках с $N = 128$ могут наблюдаться существенные отличия r_{ef} от r_0 . Радиус Фрида r_0 в выполненной серии экспериментов менялся от 0,2 до 33 см. Для каждого значения r_0 по результатам экспериментов определялся эффективный радиус Фрида r_{ef} . Анализ полученных данных позволил вывести аналитическую зависимость r_{ef} от r_0 в виде следующей аппроксимационной формулы:

$$r_{ef} = 1,82 r_0^{0,83}, \quad (12)$$

при этом значение r_0 в (12) следует подставлять в сантиметрах. При $N = 128$ формула (12) аппроксимирует полученные в экспериментах значения r_{ef} с точностью не хуже 1,4 % во всем диапазоне $0,2 \leq r_0 \leq 33$ см.

5. Заключение

Предложенный в данной статье алгоритм реализован в виде специализированных подпрограмм для IBM-совместимых компьютеров. Разработан также пользовательский интерфейс, работающий в среде Windows 3.1. и Windows-95, который позволяет легко менять параметры численных экспериментов и наблюдать на экране дисплея динамические искажения изображений и усредненные (долгоэкспозиционные) изображения. Исходные распределения световой интенсивности в плоскости объекта, являющиеся входными данными для компьютерного моделирования, вводятся в память компьютера в формате Windows Bitmap. Выходные данные представляют собой последовательность двумерных массивов, описывающих короткоэкспозиционные распределения интенсивности в

плоскости изображения с некоторым шагом по времени.

Полученные на основе построенного алгоритма данные могут быть использованы при разработке и тестировании алгоритмов обработки изображений, при моделировании адаптивных систем коррекции изображений, а также в других современных задачах прикладной оптики.

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

Авторы благодарны Н.Г. Ирошникову за большой вклад в разработку пользовательского интерфейса.

1. *Кандидов В.П., Чесноков С.С., Шленов С.А.* Компьютерное моделирование формирования изображения объекта в турбулентной атмосфере. Часть I. // Оптика атмосферы и океана. 1998. Т. 11. № 4. С. 401–405.
2. *Гудмен Дж.* Введение в Фурье-оптику. М.: Мир, 1970. 364 с.
3. *Рабинер Л., Гоулд Б.* Теория и применение цифровой обработки сигналов. М.: Мир, 1978. 848 с.

Поступила в редакцию
13 мая 1997 г.

V.P. Kandidov, S.S. Chesnokov, S.A. Shlenov. **Computer Simulation of Imaging of Extended Object through Turbulent Atmosphere. Part II. Algorithm, Examples.**

The algorithm for direct numerical simulation of random realizations of image of incoherently illuminated extended object observed through atmospheric slab is worked out on the base of the method developed in [1]. This algorithm can find use in elaborating and testing methods of image processing, in modeling adaptive arrays intended for image correction, and in other problems.