

# Компьютерная коррекция изображения, искаженного турбулентной атмосферой

А.П.Аверин, В.С.Пряничников, В.В.Тяпин

*Реализован метод компьютерной коррекции искаженных турбулентной атмосферой изображений с помощью простейшей оптической системы, состоящей из телескопа и цифровой телекамеры. В реальном масштабе времени получено дифракционное разрешение на приземных трассах длиной до 1800 м.*

**Ключевые слова:** коррекция искажений изображения, турбулентность, адаптивная оптика, цифровая обработка информации, параметр Фрида.

## 1. Введение

В настоящее время, помимо ставших уже классическими методов адаптивной оптики с использованием корректоров волнового фронта (адаптивные зеркала) [1], широко применяются методы компьютерного восстановления изображения, искаженного турбулентной атмосферой. Так, в частности, было показано [2], что дифракционно-ограниченное изображение объекта, наблюдаемого через турбулентную атмосферу, можно получить с помощью относительно недорогих абберрационных оптических систем без применения адаптивных устройств. В этой работе с использованием распределения интенсивности излучения во вспомогательной плоскости восстанавливается аппаратная функция системы «атмосфера + телескоп» (оптическая передаточная функция (ОПФ)), и с ее помощью получается восстановленное изображение наблюдаемого объекта.

Еще в эпоху традиционной фотографии был предложен метод восстановления изображения, искаженного турбулентной атмосферой, основанный на статистической обработке последовательных кадров [3]. При его использовании осуществлялась последовательная съемка объекта с временем экспозиции, не превышающим «время заморозки» атмосферы. Каждому кадру соответствовало иное пространственное распределение плотности атмосферы. Исходя из того, что при изменении угла наклона волнового фронта на приемной апертуре центр изображения сдвигается, можно осуществить суммирование изображений с их предварительным центрированием. В итоге получается суммарное изображение более высокого качества.

Очевидно, что с помощью традиционной фотографии получить восстановленное изображение высокого качества указанным методом – достаточно сложная задача из-за большой трудоемкости процесса обработки и по-

лучения исправленного изображения. В настоящей работе эта задача решается с помощью съемки объекта цифровой телекамерой, сопряженной с длиннофокусным объективом.

## 2. Алгоритм обработки информации и коррекции изображения

В основу алгоритма обработки положена модель формирования изображений объекта, учитывающая прохождение светового потока через турбулентную атмосферу [4]. Она включает в себя три фактора, ответственных за искажения изображения. Это колебания изображения, обусловленные случайными изменениями угла наклона волнового фронта в пределах апертуры, размытие его деталей, вызванное усредненными мелкомасштабными флуктуациями, и, наконец, дифракционные искажения, связанные с конечностью приемной апертуры.

Кроме того, мы использовали выражение для усредненной ОПФ  $H(\Omega)$ , вычисленное для случая коротких экспозиций с исключенными центрированием сдвигами [3, 5]:

$$H(\Omega) = \exp \left\{ -3.44 \left( \frac{\lambda \Omega}{r_0} \right)^{5/3} \left[ 1 - \alpha \left( \frac{\Omega}{\Omega_0} \right)^{1/3} \right] \right\}. \quad (1)$$

Здесь  $\Omega$  – угловая пространственная частота;  $\lambda$  – длина волны;  $\Omega_0 = D/\lambda$  – частота обрезания спектра пространственных частот оптической системой;  $D$  – диаметр апертуры;  $r_0$  – параметр Фрида. Параметр  $\alpha = 1$  для «ближнего поля» (когда существенны только фазовые эффекты) и 0.5 для «дальнего поля» (это значение применимо, когда одинаково существенны и амплитудные и фазовые искажения);  $\alpha = 0$  соответствует случаю длительной экспозиции.

Если использовать эту ОПФ в качестве обратного фильтра после центрирования, то будет исправлено остаточное мелкомасштабное размытие изображения.

Таким образом, при наличии последовательного набора изображений объекта, искаженных турбулентной атмосферой, для восстановления изображения необходимо последовательно выполнить следующие операции: измерить случайные сдвиги, исключить эти сдвиги из

А.П.Аверин, В.С.Пряничников, В.В.Тяпин. ФГУП «Государственный лазерный Центр "Радуга" им. И.С.Косыминова», Россия, Владимирская обл., 600910 Радужный, а/я 771; e-mail: anaaverin@yandex.ru, vitya-pr@yandex.ru, vvtyapin@yandex.ru

изображений (центрирование), усреднить центрированные изображения, оценить параметр Фрида, вычислить обратную ОПФ  $H^{-1}(\Omega)$ , отфильтровать усредненное изображение. В результате должно получиться стабилизированное изображение дифракционного качества, если апертура приемной системы не слишком велика по сравнению с параметром Фрида ( $D \leq (5 - 7)r_0$ ).

Вначале на изображении выбирается небольшой участок (квадрат анализа смещений) с достаточно контрастным по обеим координатам элементом объекта. Размер квадрата анализа (от 16 до 32 пикселей) определяется зоной изопланатичности атмосферы и разрешением оптической системы. В процессе коррекции текущий кадр сравнивается с опорным. Опорным кадром считается сначала первый, а затем рекурсивно усредненный центрированный кадр. Для определения смещения квадрата анализа текущего кадра вычисляется корреляция опорного и текущего кадров в пределах интервала анализа (примерно от  $-15$  до  $+15$  пикселей по каждой координате). Затем область текущего кадра с центром в квадрате анализа центрируется (т. е. сдвигается на величину измеренного смещения с обратным знаком) и рекурсивно усредняется с опорным кадром. Чтобы отслеживать медленные изменения изображения, коэффициент рекурсии можно менять. Для неподвижных объектов он составляет  $0.01 - 0.04$ . После коррекции и усреднения изображение подвергается фильтрации с использованием вышеприведенной ОПФ в качестве обратного фильтра [4]. Исправленное изображение есть обратное фурье-преобразование от отношения фурье-образа усредненного изображения к ОПФ. Параметр Фрида, входящий в выражение для ОПФ, определяется итерационным способом исходя из наилучшего качества коррекции изображения путем визуального наблюдения. Критерием оценки качества является контраст скорректированного изображения. Возможна также оценка параметра Фрида по величине дисперсии смещения кадров.

Полученное таким образом исправленное изображение выводится на текущий кадр для визуальной оценки и сравнения. Длительность обработки каждого кадра на двухъядерном компьютере с тактовой частотой 2.3 ГГц лишь незначительно влияет на частоту приема кадров для обработки, поэтому коррекцию изображения можно наблюдать в реальном масштабе времени. При увеличении скорости обработки можно корректировать изображение одновременно по всем участкам каждого кадра, а затем их объединить. Тем самым исправляется не только зона изопланатичности, но и весь кадр.

### 3. Результаты экспериментов

В экспериментах применялся телескоп с окулярным увеличением. Его входная апертура составляла 100 мм (объектив МТО-1000), а фокусное расстояние системы было равно 9.3 м. Для регистрации изображения использовалась программируемая цифровая камера RT-1000DC с быстродействием 25 (или 50) кадров в секунду, временем экспозиции  $1 - 5$  мс и размером кадра  $1024 \times 1024$  (или  $1024 \times 512$ ) пикселей. Объектом наблюдения для определения разрешающей способности служила черно-белая мира, расположенная на крыше здания на расстоянии 780 м, высота трассы наблюдения над подстилающей поверхностью менялась от 15 до 5 м. Ширина вертикальных полосок на мире уменьшается сверху вниз от

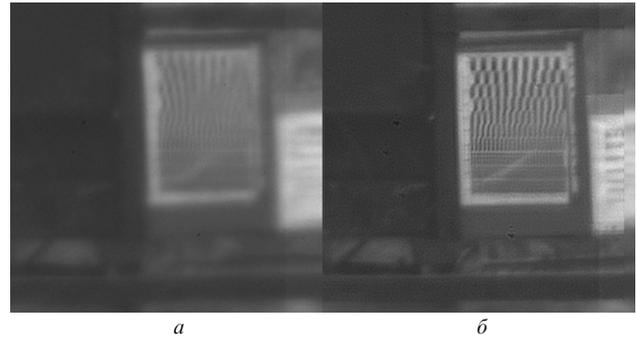


Рис.1. Изображение миры до компьютерной коррекции (а) и после нее (б). Область коррекции  $512 \times 512$  пикселей.

10 до 1 мм. Угловое разрешение оптической системы по Рэлю составляло  $0.7''$ , что соответствует 2.3 пикселя на матрице камеры и 2.7 мм на мире. Амплитуда колебаний изображения в среднем была равна 1–5 пикселям, а при сильной турбулентности доходила до 10–15.

На рис.1 показаны кадры из фильма, записанного в летний день при ясной погоде. Слева – область  $512 \times 512$  пикселей одного из кадров исходного файла (все кадры этого файла по качеству примерно одинаковы). Справа – результат коррекции этой области после обработки серии из 500 кадров. Квадрат анализа располагается в центре изображения. Визуально изображение начинает значительно улучшаться через несколько десятков кадров (2–3 с) от начала работы программы коррекции изображения. После 100–150 кадров качество изображения достигает максимума и в дальнейшем почти не меняется. Колебания исправленного изображения отсутствуют на протяжении всего фильма.

Стабильное скорректированное изображение по качеству превосходит любой исходный кадр. Разрешающая способность исправленного изображения улучшается примерно в два раза. В центральной части скорректированного изображения (в области квадрата анализа) достигается практически дифракционное разрешение. Различимы полосы шириной 3 мм в третьем снизу ряду миры. С удалением от центра кадра четкость ухудшается, поскольку искажения изображения в разных частях кадра различны. Размер центральной области изопланатичности на данном расстоянии можно оценить в  $5 - 10''$ , параметр Фрида – в 10–20 мм (около  $1/6$  диаметра апертуры).

На рис.2 показан пример работы программы коррекции изображения. Распознавался номер автомобиля, стоящего на нагретой солнцем асфальтовой дороге на рас-

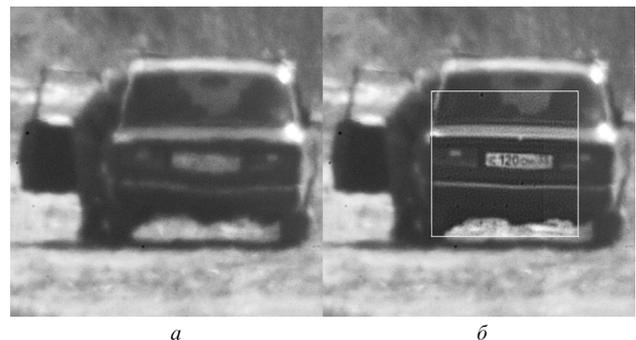


Рис.2. Номер автомобиля до коррекции (а) и после нее (б). Область коррекции  $256 \times 256$  пикселей.

стоянии около 1800 м в условиях сильных восходящих потоков воздуха. Линейное разрешение оптической системы на таком расстоянии составляло около 7 мм, толщина цифр номера автомобиля была равна 10 мм.

#### 4. Заключение

В настоящей работе в реальном времени с использованием простейшей оптической схемы осуществлена компьютерная коррекция изображения, искаженного турбулентной атмосферой. Коррекция осуществлялась на основе статистической обработки последовательных кадров, снятых телевизионной камерой на приземных атмосферных трассах протяженностью до 1800 м.

Экспериментально показано, что разрешение оптической системы в зоне изопланатичности увеличивается до дифракционного предела. Установлено, что этот предел достигается после обработки начальных 100–150 кадров.

Кроме того, отметим, что использование более скоростной камеры позволит уменьшить длительность процесса до долей секунд и расширить тем самым область коррекции на все поле зрения. В свою очередь, это даст возможность реализовать компьютерное восстановление изображения, искаженного турбулентной атмосферой, не только статичных, но и находящихся в движении объектов, включая изменение их освещенности.

Работа поддержана РФФИ (грант № 09-05-99018).

1. Тараненко В.Г., Шанин О.И. *Адаптивная оптика в приборах и устройствах* (М.: ФГУП «ЦНИИАТОМИНФОРМ», 2008).
2. Бельдюгин И.М., Герасимов В.Б., Ефимков В.Ф., Зубарев И.Г., Макаров Н.А., Михайлов С.И. *Квантовая электроника*, **35**, 873 (2005).
3. Гудмен Дж. *Статистическая оптика* (М.: Мир, 1988).
4. Кандидов В.П., Чесноков С.С., Шленов С.А. *Оптика атмосферы и океана*, **11**, 522 (1998).
5. Fried D.L. *J. Opt. Soc. Am.*, **56**, 1372 (1966).