

# Компьютерная коррекция турбулентных искажений изображения протяженного объекта на приземных трассах

А.П.Аверин, Ю.Б.Морозов, В.С.Пряничников, В.В.Тяпин

*Разработан алгоритм компьютерной коррекции изображения протяженных объектов, искаженного турбулентной атмосферой. Методом компьютерной коррекции осуществлено исправление искаженного изображения протяженного объекта на горизонтальной трассе наблюдения длиной 2300 м. Размер области исправленного изображения составил 15'.*

**Ключевые слова:** коррекция, турбулентные искажения изображений, адаптивная оптика, цифровая обработка изображений.

## 1. Введение

Адаптивные астрономические системы, предназначенные для компенсации влияния атмосферной турбулентности, корректируют изображения звёзд лишь в небольшой части поля зрения – зоне изопланатичности [1]. Но даже в этом небольшом угловом поле имеет место неравномерность определения искажений волнового фронта световой волны при наличии только одной опорной точки – лазерной звезды или обычной яркой звезды в поле зрения. Для достижения равномерности коррекции необходимы несколько опорных точек, по которым более точно определяются фазовые искажения. Проблема расширения исправленного поля зрения за пределы одной зоны изопланатичности для больших и очень больших современных астрономических телескопов в настоящее время стоит достаточно остро [2].

Для визуальных наблюдательных приборов, используемых на горизонтальных приземных трассах, создание методов компенсации турбулентности атмосферы сталкивается с рядом особенностей, из-за которых прямое применение адаптивных методов, используемых в астрономии, невозможно. Эти особенности таковы:

- слабоконтрастное (из-за атмосферной дымки) изображение объекта, заполняющее большую часть поля зрения;
- отсутствие или невозможность создания опорных точек;
- применение наблюдательных приборов в основном в светлое время суток;
- существенно более широкое поле зрения.

Кроме этого наиболее сильная турбулентность существует вблизи поверхности Земли, и она искажает изображение по всей длине трассы наблюдения (в отличие от вертикальных или наклонных астрономических трасс [3]).

Поскольку при аппаратной реализации адаптивной системы применение классических методов компенсации искажений с помощью гибких зеркал сталкивается в описанных условиях со значительными трудностями, развитие альтернативных способов борьбы с турбулентными искажениями изображений имеет большое значение.

Ранее было экспериментально показано [4], что компьютерная коррекция турбулентных искажений (без применения адаптивных зеркал) может существенно улучшить качество изображения на приземных трассах. Используемый метод основан на процедуре накопления смещенных короткоэкспозиционных изображений (shift-and-add procedure), впервые предложенной в [5]. Обобщение такого подхода в случае анизопланатичности искажений представлено в работе [6], в которой регистрировалась последовательность кадров с цифровой видеокамеры, сопряженной с небольшим телескопом. Программная обработка основывалась на модели атмосферных искажений, предложенной в [7], и сводилась к центрированию кадров колеблющегося изображения, их усреднению по времени и к последующей фильтрации, при которой использовалась теоретически рассчитанная оптическая передаточная функция атмосферы. Фактически в результате получалось изображение, эквивалентное изображению с большим временем экспозиции и свободное от искажающего влияния атмосферы. Это исправленное изображение образовывалось в небольшом фрагменте изображения объекта, контрастную часть которого анализировала программа.

В настоящей работе сделана попытка значительного увеличения корректируемой области, т. е. расширения ее на всю площадь кадра, регистрируемого видеокамерой. Приведены также дополнительные экспериментальные результаты, полученные после усовершенствования алгоритма компьютерной коррекции.

## 2. Метод коррекции

Турбулентные искажения визуально представляют собой быстропеременные изменения формы и контуров протяженных объектов в разных частях изображения. Это приводит к ухудшению качества коррекции на краях анализируемой области, что наглядно продемон-

А.П.Аверин, Ю.Б.Морозов, 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, morozov@trassa.org, vitya-pr@yandex.ru, vvtypin@yandex.ru

Поступила в редакцию 22 ноября 2010 г., после доработки – 8 февраля 2011 г.

стрировано на рис.1. Объект (лист бумаги формата А4 с надписями разной величины) находился на расстоянии около 800 м и наблюдался в телескопическую систему с апертурой 100 мм. Регистрация изображения (запись фильмов) в фокальной плоскости телескопа осуществлялась видеокамерой RT-1000DC производства Raster Technology (частота съемки 25 кадров в секунду, экспозиция 5 мс). После записи фильмы обрабатывались согласно алгоритму, описанному в [4]. На рис.1,*а* представлен небольшой участок изображения, содержащий цифры 72, на рис.1,*б* – участок с буквой К. Затем корректировке подвергалось все изображение, поперечный размер которого составлял ~ 1'. Сравнив изображения, мы видим, что при удалении от анализируемого участка качество коррекции снижается. Иными словами, исправляя фазовые искажения на одном участке изображения, мы вносим дополнительные искажения в другие участки.

Естественным развитием такого метода компьютерной коррекции является расширение хорошо корректируемой области на все поле зрения. Вообще говоря, для этого необходимо решить гидродинамическое уравнение для потока яркости в плоскости изображения и найти поле векторов смещений всех точек, как, например, в [8, 9]. В настоящей работе эта задача решалась путем разбиения поля зрения на множество (100 – 500) анализируемых участков, случайное движение которых регистрируется и центрируется независимо. Эти участки представляют собой квадраты со стороной 20 – 30 пикселей, центры которых равномерно расположены на кадре изображения в виде прямоугольной сетки с шагом 10 – 30 пикселей. Для примера на рис.2 представлена область, раз-

битая на шесть участков. Штриховые квадраты иллюстрируют их случайные смещения в текущем кадре. Для определения величины смещения вычисляется корреляционная функция яркости всех пикселей квадрата в опорном (его смысл будет ясен из дальнейшего) и текущем кадрах в пределах некоторой анализируемой области, размер которой примерно равен размеру квадрата, т.к. реально наблюдаемые смещения в экспериментах не превышают 10 – 15 пикселей даже при сильной турбулентности. Положение максимума корреляционной функции в анализируемой области для каждого квадрата позволяет определить векторы смещений опорных точек, т.е. центральных пикселей квадратов (рис.2).

После этого производится линейная интерполяция векторов смещений на все промежуточные пиксели, находящиеся между опорными точками. В результате получается «непрерывное» поле двумерных векторов смещений для каждой точки изображения.

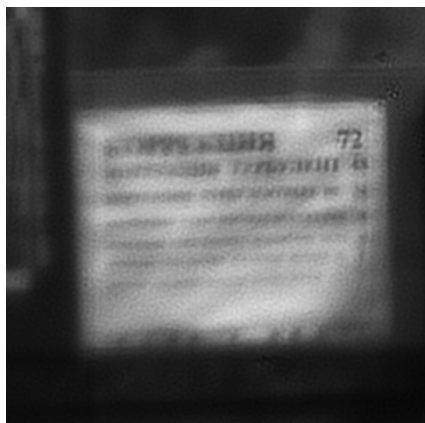
Следующим шагом является обратное смещение, или приведение всех точек изображения в текущем кадре к правильному положению, которое эти точки занимают в опорном кадре. Обозначим распределение яркости в опорном кадре как  $J_n(x, y)$ . Эта функция формируется и уточняется после обработки каждого текущего кадра следующим образом. Пусть  $I_n(x, y)$  – распределение яркости в текущем  $n$ -м кадре,  $rx_n(x, y)$ ,  $ry_n(x, y)$  – компоненты вектора смещений в точке  $(x, y)$  этого кадра. Тогда  $I_n[x + rx_n(x, y), y + ry_n(x, y)]$  есть правильное (несмещенное) значение яркости в точке  $(x, y)$ , а распределение яркости в опорном кадре вычисляется путем рекурсивного усреднения:

$$J_n(x, y) = (1 - K)J_{n-1}(x, y) + KI_n[x + rx_n(x, y), y + ry_n(x, y)], \tag{1}$$

где  $K = 0.01 - 0.05$  – коэффициент рекурсии. После этого необходимо произвести выравнивание всех точек по среднему смещению. Находятся рекурсивные средние значения смещений

$$\langle rx_n(x, y) \rangle = (1 - K)\langle rx_{n-1}(x, y) \rangle + Krx_n(x, y), \tag{2}$$

$$\langle ry_n(x, y) \rangle = (1 - K)\langle ry_{n-1}(x, y) \rangle + Kry_n(x, y). \tag{3}$$



*а*



*б*

Рис.1. Коррекция турбулентных искажений изображения по цифрам 72 (*а*) и по букве К в верхней строчке (*б*).

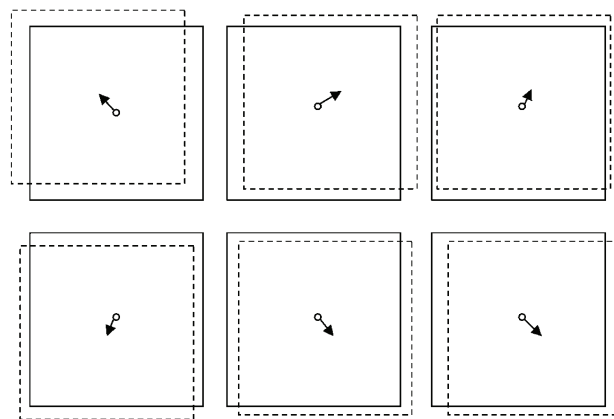


Рис.2. Разбиение изображения на квадратные анализируемые участки (сплошные линии). Штриховые квадраты – их случайные смещения, стрелки – измеренные векторы смещений центральных пикселей квадратов.

Затем точки в опорном кадре сдвигаются на эти величины:

$$J_n(x, y) = J_n[x - \langle rx_n(x, y) \rangle, y - \langle ry_n(x, y) \rangle]. \quad (4)$$

После выполнения этих операций искривления контуров предметов и линий устраняются, изображение становится практически неподвижным (при указанных выше значениях коэффициента рекурсии). Таким образом, опорный кадр формируется из исправленных кадров, фактически он и представляет собой скорректированное рекурсивно усредненное изображение.

Затем необходимо применить обратную фильтрацию для устранения остаточного размытия полученного усредненного изображения, обусловленного влиянием мелкомасштабной турбулентности. Это остаточное размытие, например для одной яркой точки, представляет собой пятно с колоколообразным распределением яркости, ширина которого зависит от интенсивности турбулентности. Фильтрация состоит в преобразовании этого размытого пятна в дифракционно-ограниченную картину Эйри. Фильтрация изображения и получение конечного результата, т. е. распределения яркости неискаженного изображения  $J(x, y)$ , производятся путем двумерного прямого фурье-преобразования (оператор  $F$ ) скорректированного усредненного изображения  $J_n(x, y)$ , умножения полученного спектра на обратную оптическую передаточную функцию  $H^{-1}(x, y)$  аналогично [4] и обратного фурье-преобразования (оператор  $F^{-1}$ ):

$$J(x, y) = F^{-1}[F(J_n(x, y))H^{-1}(x, y)]. \quad (5)$$

Улучшение конечного изображения  $J(x, y)$  при включении алгоритма обработки происходит постепенно, по мере накопления кадров. В среднем необходимо обработать не менее 100 последовательных кадров.

### 3. Результаты экспериментов

Реализация описанного выше алгоритма показала, что он является вполне работоспособным и эффективным, но довольно медленным. Производительность и скорость применяемых для обработки компьютеров пока не позволяют осуществлять коррекцию кадров по всей их площади ( $1024 \times 1024$  пикселя) в реальном времени, поэтому обработке подвергались только видеофильмы. На рис.3,а демонстрируется применение алгоритма к тому же фильму, что и на рис.1. Область коррекции разделена примерно на 200 квадратов. В отличие от рис.1, качество коррекции одинаково по всей области, все буквы и цифры на верхней строчке видны четко. Для оценки эффективности коррекции на рис.3,б приведено также изображение, эквивалентное изображению с длинной экспозицией без применения коррекции. Оно получено простым усреднением кадров с тем же коэффициентом рекурсии (0.02), что и при коррекции. Примерно так же будет виден объект при наблюдении глазом, постоянная времени которого равна  $\sim 40$  мс. Предельное дифракционное разрешение телескопа в данных условиях составляет  $\sim 3$  мм на объекте, что примерно равно толщине букв во второй строчке.

На рис.4 демонстрируется коррекция турбулентного изображения по всей площади кадра и, следовательно, в большом поле зрения, ограниченном разрешающей способностью телескопа и количеством пикселей на матрице

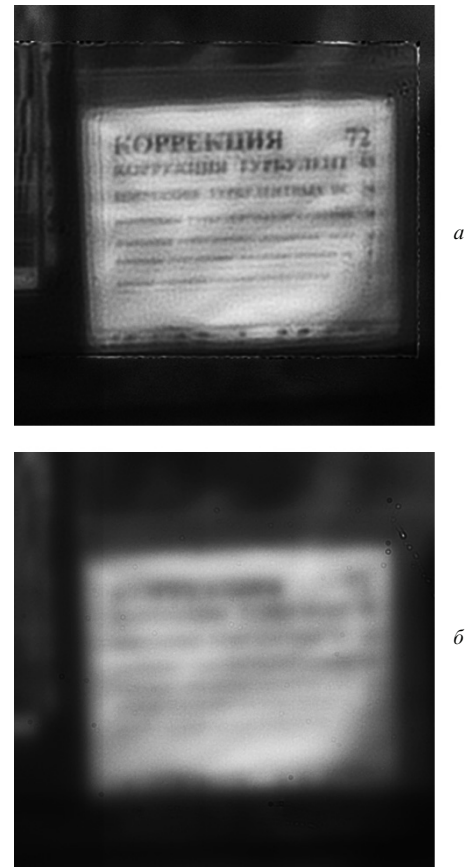


Рис.3. Коррекция изображения по многим участкам (а) и необработанное усредненное изображение (б).

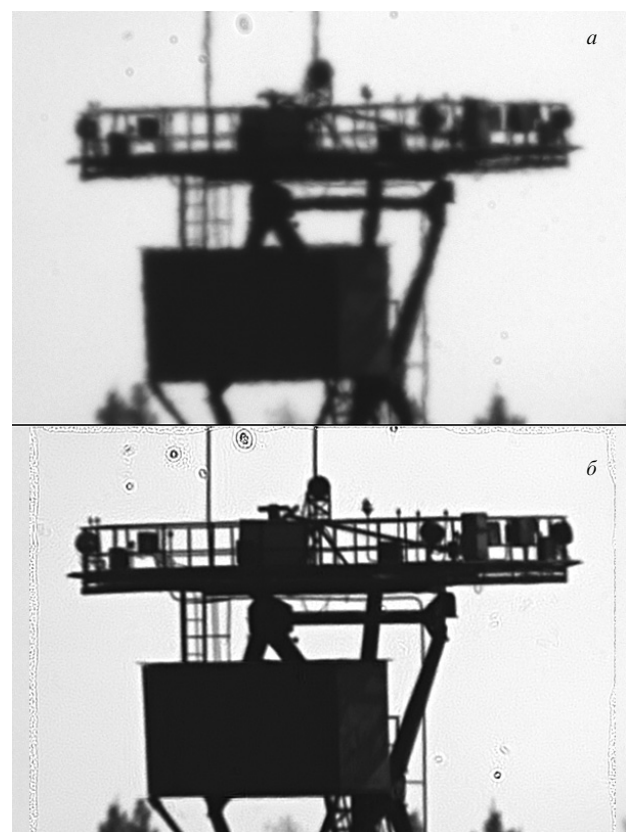


Рис.4. Улучшение качества изображения по всей площади кадра при «многоточечной» коррекции.

видеокамеры. Разрешающая способность использованного телескопа (примерно  $1''$ ) соответствует одному пикселю на изображении. Для данного кадра размером  $800 \times 600$  пикселей поле зрения составляет около  $15'$ . Объект – металлическая вышка высотой 20 м с верхней смотровой площадкой шириной 8 м – расположен на расстоянии около 2300 м от места наблюдения. На рис.4,а представлено изображение, полученное с малой экспозицией (один кадр из фильма), на котором имеют место как случайные искажения контуров металлоконструкций, так и общая размытость и нечеткость. Эти искажения меняются от кадра к кадру. Изображение на рис.4,б является результатом вышеописанной «многоточечной» коррекции после обработки 250 последовательных кадров. Сравнив оба изображения, можно отметить, что на рис.4,б четкость значительно повысилась на всей площади кадра, изображение неподвижно (если смотреть в динамике), контуры предметов и прямые линии выровнялись. Таким образом, качество изображения существенно улучшилось. Дальнейшее увеличение числа кадров не приводит к заметному улучшению изображения. Крупные черные точки на фоне неба – это пылинки на матрице видеокамеры, рамка на рис.4,б – граница области коррекции.

Следует отметить, что алгоритм работает эффективно только в случае неподвижных объектов, что связано с быстродействием используемой видеокамеры. Как было сказано выше, необходимо накопить достаточное количество кадров (не менее 100) с различными реализациями фазовых искажений, чтобы получить максимально улучшенное изображение. Это можно, в принципе, осуществ-

ить за время 0.1–0.2 с, поскольку случайные реализации сменяются примерно за 1 мс (время «замороженности» атмосферы). В таком случае возможна коррекция изображений объектов, движущихся в кадре с небольшой скоростью.

#### 4. Заключение

Разработан алгоритм компьютерной коррекции искаженных турбулентностью изображений, позволивший получить изображение, исправленное по всей площади кадра (поле зрения около  $15'$ ). Использованный метод улучшает видимость удаленных протяженных объектов в атмосфере, существенно устраняет влияние турбулентности и повышает разрешающую способность наземных наблюдательных систем.

Работа проведена при поддержке РФФИ (грант № 09-05-99018).

1. Fried D.L. *J. Opt. Soc. Am.*, **72**, 52 (1982).
2. Tyler G.A. *J. Opt. Soc. Am.*, **1**, 409 (1994).
3. Орлов В.М., Самохвалов И.В., Креков Г.М. и др. *Сигналы и помехи в лазерной локации* (М.: Радио и связь, 1985).
4. Аверин А.П., Пряничников В.С., Тяпин В.В. *Квантовая электроника*, **40** (5), 418 (2010).
5. Bates R.H.T., Cady F.M. *Opt. Commun.*, **32**, 365 (1980).
6. Charnotskii M.I. *J. Opt. Soc. Am. A*, **10** (3), 492 (1993).
7. Кандидов В.П., Чесноков С.С., Шленов С.А. *Оптика атмосферы и океана*, **11** (4), 401 (1998); **11** (5), 517 (1998).
8. Яне Б. *Цифровая обработка изображений* (М.: Техносфера, 2007).
9. Дудоров В.В., Колосов В.В. *Оптика атмосферы и океана*, **23** (5), 392 (2010).