

# Обработка цифровых изображений для коррекции атмосферных турбулентных искажений в реальном времени

П.А. Коняев\*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН  
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 12.04.2021 г.

Рассмотрены алгоритмы цифровой обработки двумерных сигналов, предназначенные для коррекции искажений изображений при наблюдении на атмосферных трассах в реальном времени. Предложена процедура измерения параметра турбулентности непосредственно в момент наблюдения как с применением референтного объекта в виде радиальной миры, так и без него. Для коррекции дрожания изображения, вызванного атмосферой, использован эффективный быстродействующий алгоритм корреляционного слежения с нормировкой опорного кадра. Алгоритмы восстановления размытого изображения, основанные на методе инверсной фильтрации угловых пространственных частот, реализованы с помощью процедур параллельных вычислений из библиотек Intel MKL и IPP. Приведены результаты компьютерного моделирования турбулентного расплывания цифровых изображений и его коррекции, а также примеры обработки экспериментальных видеок кадров на реальных атмосферных трассах.

*Ключевые слова:* оптико-электронные системы, атмосферная турбулентность, цифровая обработка изображений, параллельные вычислительные алгоритмы; *optical-electronic systems, atmospheric turbulence, digital image processing, parallel computational algorithms.*

## Введение

Для решения прикладных задач, связанных с получением изображений в атмосфере, уже давно и успешно используется подход, основанный на цифровой регистрации изображений и последующем улучшении их качества путем компьютерной обработки [1]. Появление цифровых видеокамер и прогресс в компьютерной технике лишь стимулировали интерес к этой теме, так как появилась возможность применения разработанных методов в реальном времени, в частности при наблюдениях на атмосферных трассах [2]. Наибольшее количество публикаций по алгоритмам обработки изображений посвящено методу «слепой деконволюции», когда оптическая передаточная функция (ОПФ) искажающего элемента оптического тракта неизвестна [3]. Однако применение развитых в подобных работах методов, основанных на итерационных алгоритмах, для наблюдений в реальном времени затруднительно, так как требует большого объема вычислений.

В последние годы появились работы, в которых предложен метод накопления коротко-экспозиционных кадров с последующей инверсной фильтрацией изображения [4, 5]. Алгоритмы восстановления включают стабилизацию «области интереса»

(ROI – region of interest), сегментирование ROI, стабилизацию сегментов (block matching), накопление и обратную (инверсную) фильтрацию ROI. Необходимость подобных мер вызвана тем, что приземная турбулентность на протяженных атмосферных трассах в длиннофокусных оптических системах с узким полем зрения проявляет себя в виде блуждания и дрожания изображения и его фрагментов, а также в геометрических искажениях деталей сцены. Точность и быстродействие вышеупомянутых алгоритмов в итоге могут определять качество восстановленных изображений, полученных в умеренно сильной турбулентности в условиях анизопланатизма [6].

Настоящая работа содержит дальнейшее развитие описанного в [4, 5] подхода. Предложены процедуры измерения интенсивности турбулентности для реконструкции изображений методом обратной фильтрации для двух сценариев наблюдения: с референтным объектом (радиальной мирой) и без него. Для стабилизации дрожания ROI используется эффективный быстродействующий алгоритм корреляционного трекинга с нормировкой опорного кадра. Программное обеспечение реализовано с помощью процедур параллельных вычислений из библиотек Intel MKL и IPP. Приведены примеры компьютерного моделирования турбулентного размытия цифровых изображений и их коррекции, а также результаты обработки видеок кадров, полученных в ИОА СО РАН в эксперименте на реальных атмосферных трассах.

\* Петр Алексеевич Коняев (petrkonyaev@gmail.com).

## Вид передаточной функции оптической системы для коррекции атмосферных искажений

Спектр мощности средней интенсивности (освещенности) некогерентного изображения в оптической системе с цифровой обработкой видеосигнала можно представить в канонической операторной форме через функцию передачи модуляции ФПМ (модуль комплексной ОПФ) в виде каскада преобразователей [2]:

$$S_1(\mathbf{v}) = S_0(\mathbf{v})F_A(\mathbf{v})F_T(\mathbf{v})F_C(\mathbf{v}). \quad (1)$$

Здесь  $\mathbf{v} = |\mathbf{v}(v_x, v_y)|$  – модуль вектора пространственной частоты;  $S_1(\mathbf{v})$  – комплексная амплитуда двумерного пространственного спектра (преобразования Фурье) средней интенсивности изображения;  $S_0(\mathbf{v})$  – амплитуда спектра средней интенсивности объекта; вещественные функции  $F_A(\mathbf{v})$ ,  $F_T(\mathbf{v})$ ,  $F_C(\mathbf{v})$  – ФПМ атмосферы, телескопа и блока цифровой обработки соответственно. В случае идеального телескопа с круглой осесимметричной апертурой диаметром  $D$  с резкими краями формула для передаточной функции хорошо известна [2]:

$$F_T(v') = 2/\pi \left[ \arccos(v') - v' \sqrt{1-v'^2} \right], \quad (2)$$

где  $v' = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} / \Omega_D$  – радиальная нормированная частота;  $0 \leq v' \leq 1$ . Нормировка производится на частоту дифракционного среза  $\Omega_D = D/\lambda$  передаточной функции телескопа. Длина волны для естественного освещения принимается за среднюю величину  $\lambda = \bar{\lambda} = 0,5\mu$ .

Выражение для коротко-экспозиционной ФПМ размытия изображения в турбулентной атмосфере для режимов ближнего и дальнего полей впервые получено Д. Фридом [7]:

$$F_A(\mathbf{v}) = \exp \left\{ -3,44 (v/\Omega_0)^{5/3} \left[ 1 - \alpha (v/\Omega_D)^{1/3} \right] \right\}. \quad (3)$$

Здесь частота атмосферного среза  $\Omega_0 = r_0/\lambda$  ( $r_0$  – радиус когерентности) отвечает за интенсивность искажений, а параметр  $\alpha$  – за длительность экспозиции и характер искажений:  $\alpha = 1$  в режиме ближнего поля ( $D \gg \sqrt{\lambda L}$ ),  $0,5$  в режиме дальнего поля ( $D \ll \sqrt{\lambda L}$ ) и  $0$  в режиме длительной экспозиции ( $T \gg 0,01$  с). Параметр турбулентности  $D_0 = D/r_0$  определяет отношение диаметра приемной апертуры к радиусу когерентности сферической волны и одновременно, согласно формуле (3), является отношением дифракционной и атмосферной частот среза  $D_0 = \Omega_D/\Omega_0$  и, следовательно, характеризует силу турбулентного размытия.

Таким образом, влияние атмосферной турбулентности можно компенсировать методом инверсной фильтрации с учетом того, что ФПМ атмосферы представляет собой экспоненциальный низ-

кочастотный фильтр пространственных частот. Для этого в блоке цифровой обработки  $F_C(\mathbf{v})$  в формуле (1) после преобразования оптического изображения в цифровую форму необходимо реализовать оператор фильтрации в виде  $F_C = F_T^{-1}F_A^{-1}$ . На высоких частотах вблизи нуля фильтрующей функции (3) этот алгоритм может привести к переполнению разрядной сетки процессора. В качестве метода регуляризации на практике используются весовая функция телескопа  $F_T$ , а также алгоритм ограничения усиления.

## Измерение параметра турбулентности $D_0$ и моделирование расплывания изображения

Для реконструкции изображения на входе алгоритма вычисления обратного фильтра  $F_A^{-1}$ , согласно (3), необходимо задать значения параметров  $\alpha$  и  $D_0$ . Параметр  $\alpha$  выбирается по условиям наблюдения – длине трассы и длительности экспозиции. Параметр турбулентности  $D_0$ , как правило, неизвестен, но может быть измерен, причем непосредственно на трассе наблюдения. В настоящей работе предлагается применять для этого методику пассивных оптических измерений, разработанную и апробированную нами на атмосферных трассах [9].

На практике возможны два сценария наблюдения – с использованием специального измерительного прибора в качестве референтного объекта и без него. Первый вариант отличается от второго повышенной точностью измерения. В этом случае в качестве измерительного инструмента предлагается использовать бинарную радиальную миру с единичным контрастом  $C_M = 1$ . Для нахождения  $r_0$  предлагается с помощью несложного алгоритма измерять диаметр размытия миры  $d_q$  и по нему находить угловое разрешение  $\varphi_q = d_q \theta / f$  для заданного порогового значения контраста  $q$ . Здесь  $\theta$  – угловой период полного сектора миры;  $f$  – фокусное расстояние оптической системы [8]. После этого, используя выражение для радиуса когерентности сферической волны через структурную характеристику показателя преломления, находим

$$r_0 = (0,159g(q))^{-3/5} \lambda / \varphi_q,$$

где

$$g(q) = 1,8 \ln [4C_M F_T(4\pi/d_q \theta) / \pi q]. \quad (4)$$

Результаты компьютерного моделирования расплывания в режиме дальнего поля  $\alpha = 0,5$  и восстановления по формуле (4) цифрового изображения тестовой миры для трех значений параметра турбулентности  $D_0 = 10, 20, 30$  приведены на рис. 1.

В верхнем ряду картины размытия содержатся окружности с пороговым контрастом видимости  $q = 0,05$ , измеряемым программой. В нижнем ряду

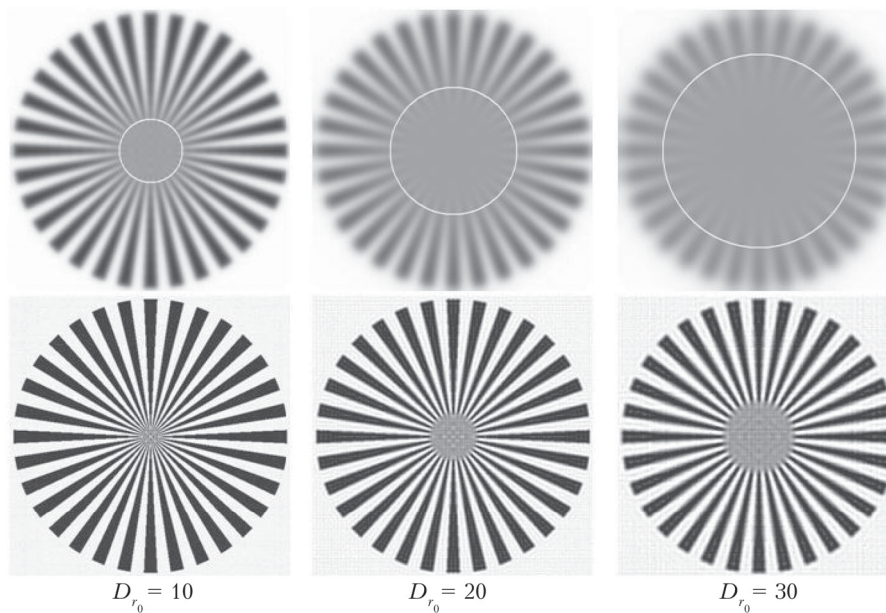


Рис. 1. Компьютерное моделирование размытия в дальней зоне бинарной радиальной миры (верхний ряд) и восстановления методом обратной фильтрации (нижний ряд)

показаны результаты реконструкции размытия методом обратной фильтрации по измеренным значениям  $D_{r_0}$ . Точность измерений (начальное угловое разрешение используемой миры) зависит от полярного периода полного сектора  $\theta$ , т.е. от числа секторов миры. На рис. 2 приведены графики зависимости эффективного радиуса спектральной амплитуды размытого изображения  $S_1(v)$ :

$$a_{\text{ef}} = \left\{ \frac{\int_0^{\Omega_D} v^2 S_1(v) dv}{\int_0^{\Omega_D} S_1(v) dv} \right\}^{1/2} \quad (5)$$

от параметра турбулентности для радиальных мир с числом секторов 8, 16, 32 и 64. Эффективный радиус спектра однозначно связан с  $D_{r_0}$  и может быть использован для измерения этого параметра турбулентности методом калибровки.

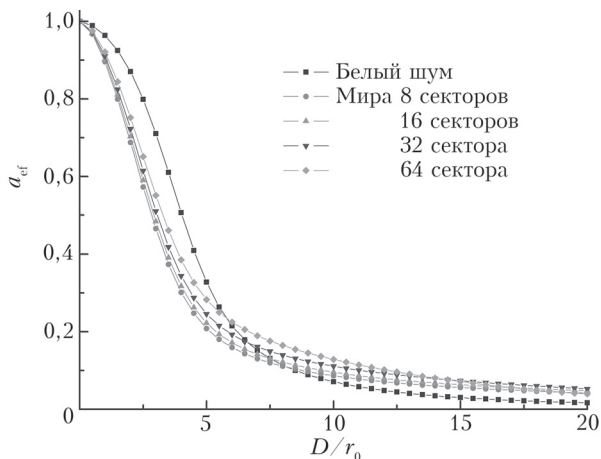


Рис. 2. Зависимость нормированного эффективного радиуса спектральной амплитуды миры от  $D_{r_0}$  для различного числа секторов миры

С целью сравнения на рис. 2 приведен график для «идеальной» тестовой модели объекта – генератора белого шума, обладающего равномерным распределением амплитуды во всем диапазоне спектра угловых пространственных частот. По поведению кривых видно, что в слабой турбулентности все четыре миры дают близкие результаты, но по мере увеличения  $D_{r_0}$  скорость падения разрешения тем меньше, чем больше число секторов. Чтобы расширить диапазон измерений, мира с числом секторов 64 была выбрана для проведения экспериментов на реальных атмосферных трассах.

## Коррекция распыления изображения на атмосферных трассах в реальном времени

Во втором сценарии наблюдения, при котором отсутствует возможность применения специального инструмента для измерения  $D_{r_0}$ , предлагается оценивать параметр турбулентности по измерению дрожания изображения самого объекта наблюдения. Для этого в настоящей работе оценивается радиус когерентности  $r_0$  по дисперсии флуктуаций углов прихода  $\sigma_\gamma^2$  путем измерения в плоскости изображения дрожания ROI методом корреляционного слежения [10]:

$$r_0 = (0,1447k^2 D^{1/3} \sigma_\gamma^2)^{-3/5}, \quad \text{где } k = 2\pi/\lambda. \quad (6)$$

Для коррекции распыления методом обратной фильтрации осуществлялось «синтезирование» усредненного цифрового изображения ROI, которое затем подвергалось цифровой обработке. Для усреднения выбирались ROI из серии кадров с экспо-

зицей короткой длительности ( $< 1$  мс). Перед накоплением стабилизировалось дрожание ROI, для чего использовался эффективный параллельный алгоритм корреляционного трекинга с нормировкой опорного кадра [10]. Фактически обе операции – измерение дрожания ROI с вычислением  $r_0$  и стабилизация кадра – выполняются одновременно, что ускоряет обработку.

В условиях умеренной и сильной турбулентности в кадре изображения могут появляться зоны «анизопланатизма», смещения которых не зависят друг от друга, тогда возникает необходимость в сегментировании кадров. Это усложняет вычисления и может замедлить работу компьютерной программы, делая невозможными наблюдения в реальном времени. С целью ускорения вычислений для реализации всех процедур измерений и цифровой обработки были созданы параллельные вычислительные алгоритмы, основанные на следующих функциях библиотек Intel MKL [11] и IPP: преобразование формата кадра – `ippiConvert_8u32f`, медианная фильтрация – `ippiFilterMedian_32f`,

нормализация яркости – `ippsNormalize_32f`, извлечение ROI – `ippmExtract_m_32f`, быстрое двумерное преобразование Фурье – `MKL_DFTI`.

Эксперименты на приземной трассе длиной 475 м на Базовом экспериментальном комплексе (БЭК) ИОА СО РАН проводились с радиальной мирой с числом секторов 64. Захват кадров осуществлялся цифровой видеокамерой со временем экспозиции 0,5 мс и частотой 100 Гц на телескопе с  $D = 15$  см. На рис. 3 слева показан типичный кадр серии из 1000 кадров, который является одной мгновенной выборкой из ансамбля случайных реализаций и имеет характерные искажения, присущие коротко-экспозиционному изображению. Путем усреднения таких выборок за интервал времени 10 с была получена картина средней интенсивности (рис. 3 в центре), по которой измерялся  $D_0$  и производилась коррекция расплывания (рис. 3 справа).

Наблюдения за реальными объектами на приземной трассе длиной 2 км проводились без референтного объекта. На рис. 4 слева показано мгновенное размытое изображение сцены без обработки.

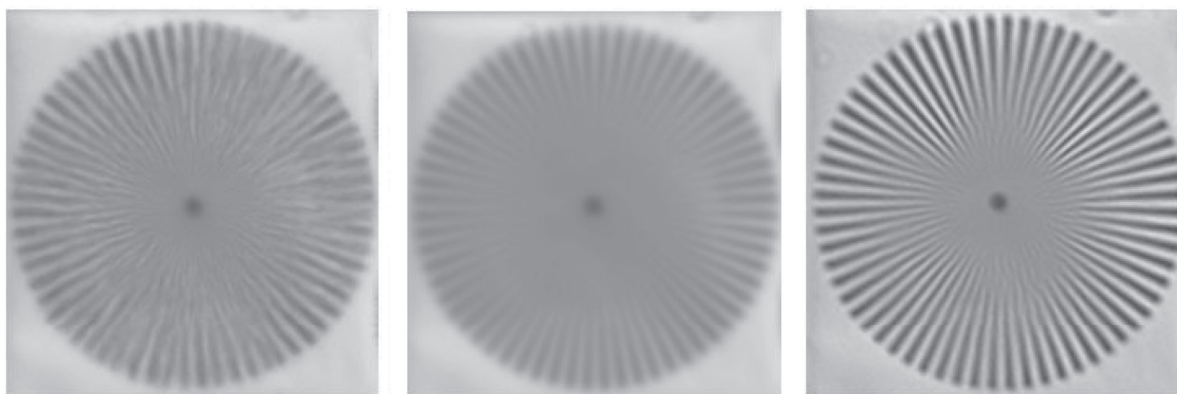


Рис. 3. Коротко-экспозиционный кадр (0,5 мс) изображения миры в режиме ближнего поля на трассе длиной 475 м (слева), результат усреднения по серии из 1000 кадров (в центре) и восстановления изображения методом обратной фильтрации (справа)



Рис. 4. Пример размытого атмосферой реального изображения из серии кадров, полученных на дистанции 2 км (слева), и результат восстановления ROI методом обратной фильтрации в реальном времени (справа)

ROI находилась в центре кадра и имела квадратную форму размером  $256 \times 256$  пикселей. После стабилизации ROI в каждом кадре производилось ее рекурсивное усреднение в реальном времени наблюдения, а также обратная фильтрация и вывод на монитор монохромного изображения с частотой 25 Гц (рис. 4 справа). В условиях слабо-умеренной турбулентности удавалось увеличивать размер ROI до разрешения HD ( $1280 \times 720$  пикселей) и проводить наблюдение с частотой 20 Гц, используя стандартный PC (процессор Intel i7 3,5 ГГц).

### Заключение

Приведены примеры компьютерного моделирования турбулентного размытия цифровых изображений и их коррекции, а также результаты восстановления монохромных изображений в реальной атмосфере. Полученные данные позволяют сделать вывод о возможности и эффективности метода обратной фильтрации для коррекции турбулентных искажений в реальном времени и с высоким разрешением.

Применение для измерения дрожания ROI алгоритма корреляционного слежения (трекинга) с нормировкой опорного кадра показывает его высокую надежность в условиях развитой турбулентности при сегментировании ROI. Реализация метода в виде параллельных вычислительных процедур с использованием функций из библиотек Intel MKL и IPP делает возможным проведение наблюдений на атмосферных трассах в реальном времени. Изменения интенсивности турбулентности во времени контролируются введенной в процесс наблюдения процедуре измерения  $D_n$ , поэтому корректировка коэффициента усиления в обратном фильтре происходит постоянно. Благодаря этому появляется возможность адаптивной коррекции и регистрации изображения в автоматическом режиме.

Переход от монохромных изображений к цветным должен увеличить время цифровой обработки, поэтому необходимы дальнейшие усилия по повышению производительности вычислений и оптимизации процедур. Для комфортного наблюдения с частотой кадра 25 Гц цветного изображения с очень высоким разрешением (например, стандарта Full HD  $1920 \times 1080$  пикселей) применение метода обратной фильтрации может потребовать мощ-

ностей современной высокопроизводительной рабочей станции с многоядерным процессором частотой до 5 ГГц.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИОА СО РАН.

1. *Бейтс Р., Мак-Доннелл М.* Восстановление и реконструкция изображений. М.: Мир, 1989. 528 с.
2. *Гудмен Дж.* Статистическая оптика. М.: Мир, 1988. 528 с.
3. *Huebner C.S., Greco M.* Blind deconvolution algorithms for the restoration atmospherically degraded imagery: A comparative analysis // Proc. SPIE. 2008. V. 7108. P. 71080M 1–12.
4. *Huebner C.S.* Compensating image degradation due to atmospheric turbulence in anisoplanatic conditions // Proc. SPIE. 2009. V. 7351. P. 735106.
5. *Аверин А.П., Морозов Ю.Б., Пряничников В.С., Тянин В.В.* Компьютерная коррекция турбулентных искажений изображения протяженного объекта на приземных трассах // Квант. электрон. 2011. Т. 41, № 5. С. 475–478.
6. *Дудоров В.В., Насонова А.С.* Сравнение постдетекторной коррекции коротко- и длинно- экспозиционных изображений, сформированных традиционными и многоапертурными системами наблюдения в турбулентной атмосфере // Оптика атмосфер. и океана. 2020. Т. 33, № 8. С. 598–603. DOI: 10.15372/AOO20200803; *Dudorov V.V., Nasonova A.S.* Comparison of postdetection correction of short- and long-exposure images formed by traditional and multiaperture observation systems in a turbulent atmosphere // Atmos. Ocean. Opt. 2020. V. 33, N 6. P. 578–583.
7. *Fried D.L.* Optical resolution through a randomly inhomogeneous medium for very long and very short exposures // J. Opt. Soc. Am. 1966. V. 56, N 10. P. 1372–1379.
8. *Гурвич А.С., Кон А.И., Мионов В.Л., Хмелевцов С.С.* Лазерное излучение в турбулентной атмосфере. М.: Наука, 1976. 277 с.
9. *Коняев П.А., Ботыгина Н.Н., Антошкин Л.В., Емалеев О.Н., Лукин В.П.* Об измерении структурной характеристики показателя преломления атмосферы пассивными оптическими методами // Оптика атмосфер. и океана. 2015. Т. 28, № 8. С. 738–741; *Konyaev P.A., Botygina N.N., Antoshkin L.V., Emaleev O.N., Lukin V.P.* Passive optical methods in measurement of the structure parameter of the air refractive index // Atmos. Ocean. Opt. 2015. V. 28, N 6. P. 522–525.
10. *Konyaev P.A., Lukin V.P., Botygina N.N., Emaleev O.N.* Wavefront sensors for adaptive optical systems // Meas. Sci. Rev. 2010. V. 10, N 3. P. 102–107.
11. URL: <https://software.intel.com/> (last access: 21.03.2021).

#### *P.A. Konyaev. Image processing for real-time correction of atmospheric turbulent distortions.*

Algorithms for real time two-dimensional digital image processing when observing on atmospheric paths are considered. A procedure for measuring the turbulence parameter directly during observation is suggested. It can be applied both with the use of a reference object (a radial mire), and without it. An efficient high-speed correlation tracking algorithm with reference frame normalization was applied to correct the image jitter caused by the atmosphere. Blurred image restoration algorithms based on the inverse filtration of angular spatial frequencies are implemented with the use of parallel computing procedures from the Intel® MKL and IPP libraries. The results of computer simulation of digital images blur and its correction are presented, as well as examples of processing experimental video frames on real atmospheric paths.