

Сравнение постдетекторной коррекции коротко- и длинноэкспозиционных изображений, сформированных традиционными и многоапертурными системами наблюдения в турбулентной атмосфере

В.В. Дудоров, А.С. Насонова*

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

Поступила в редакцию 6.05.2020 г.

Проанализирована эффективность восстановления искаженных атмосферной турбулентностью изображений, сформированных одноапертурными и многоапертурными системами. На основе численного моделирования показано, что использование многоапертурных систем наблюдения для компьютерной коррекции атмосферных искажений в условиях анизопланатизма позволяет существенно сократить время экспозиции. При этом основные искажения хорошо корректируются при синтезировании изображений за время короткой экспозиции, соответствующей случаю «замороженной» турбулентной среды. Для коррекции остаточных мелкомасштабных искажений требуется на порядок меньше времени, чем в случае синтеза длинноэкспозиционных изображений, полученных с помощью традиционных одноапертурных систем наблюдения.

Ключевые слова: многоапертурные системы, турбулентная атмосфера, некогерентное изображение; multiaperture system, turbulent atmosphere, incoherent image.

Введение

При наблюдении за удаленными объектами через атмосферу часто используют методы постдетекторной (компьютерной) коррекции изображений. Один из наиболее эффективных методов компьютерной коррекции основан на решении обратной задачи восстановления структуры объекта из его размытого изображения [1, 2]. При этом для корректного решения обратной задачи в условиях сильной турбулентности традиционно используют накопление изображений во времени [2–6], что делает невозможным анализ динамически изменяющихся сцен наблюдения. В случае, когда объект наблюдения не является статичным, для формирования изопланарно искаженных изображений усреднение турбулентных искажений по времени можно заменить на их усреднение по пространству. Такой подход, основанный на разделении приемной апертуры [1, 7–8], реализуется в многоапертурных системах [9, 10], когда одновременно регистрируется ряд одинаковых субизображений, количество которых определяется числом приемных субапертур. Для решения обратной задачи в этом случае формируется синтезированное изображение, которое является суммой (наложением) одновременно зарегистрированных суб-

изображений. Кроме усреднения анизопланарных короткоэкспозиционных искажений, необходимого для корректного решения обратной задачи, такой подход позволяет без использования адаптивной оптики компенсировать локальные (в пределах каждой субапертуры) наклоны волнового фронта, пришедшего от объекта и искаженного турбулентными неоднородностями воздуха [7, 8]. Однако, как нами было показано ранее [8], при замене усреднения по времени (в одноапертурных системах) на усреднение по ансамблю субапертур (в многоапертурных системах) не удается полностью избавиться от анизопланатизма искажений: в восстановленных короткоэкспозиционных изображениях присутствуют остаточные мелкомасштабные искажения, чего не наблюдается при восстановлении изопланарных длинноэкспозиционных изображений.

Настоящая работа посвящена анализу причин присутствия остаточных искажений в восстановленных изображениях, синтезированных многоапертурными системами, и возможности их устранения при увеличении времени экспозиции. Анализ выполнен на основе сравнения эффективности восстановления искаженных турбулентностью длинноэкспозиционных изображений при использовании одноапертурных и многоапертурных систем наблюдения. При этом рассматриваются многоапертурные системы с плотной упаковкой матрицы субапертур, поперечный размер которой совпадает с размером одноапертурной

* Вадим Витальевич Дудоров (dvv@iao.ru); Анна Сергеевна Насонова (an.s.eremina@gmail.com).

системы. Другими словами, если одноапертурная система, диаметр приемного телескопа которой равен D , сравнивается с многоапертурной системой, состоящей из матрицы $n \times n$ субапертур, то диаметр каждой субапертуры $d = D/n$.

1. Коррекция изопланарно искаженных (длинноэкспозиционных) изображений в одноапертурных системах

Известно, что в случае наблюдения объектов через атмосферу на горизонтальных трассах короткоэкспозиционные изображения, сформированные за время, существенно меньшее времени корреляции турбулентных неоднородностей воздуха, характеризуются сильным анизопланатизмом (неоднородностью) искажений [1–6]. Это существенное препятствие при компьютерном восстановлении изображений методами обратной свертки. Очевидно, что при длинной экспозиции за время, существенно превышающее время корреляции турбулентных неоднородностей воздуха, анизопланарные искажения усредняются, и это приводит к однородному размытию всего изображения. При этом, несмотря на то, что ширина функции размытия точки (ФРТ) для длинной экспозиции больше эффективной ширины короткоэкспозиционной ФРТ, изопланарность длинноэкспозиционного изображения позволяет выполнить операцию обратной свертки наиболее корректно.

Для анализа эффективности коррекции турбулентных искажений мы использовали метод численного моделирования некогерентных изображений на основе решения уравнения переноса излучения для функции яркости с использованием гауссовой аппроксимации апертурной функции пропускания приемного телескопа [7, 8].

На рис. 1 показано, как зависит качество синтезированного одноапертурной системой изображения от времени экспозиции. В нашем численном эксперименте это время определялось числом реализаций турбулентных неоднородностей воздуха, по которым выполнялось усреднение короткоэкспозиционных изображений. Видно, что при увеличении числа псевдослучайных реализаций «замороженной» турбулент-

ной среды происходит усреднение анизопланарных искажений. Сумма двадцати короткоэкспозиционных изображений, соответствующих некоррелированным реализациям случайных турбулентных неоднородностей, позволяет гораздо лучше идентифицировать структуру объекта, чем любая короткоэкспозиционная реализация. Увеличение числа реализаций турбулентности до 100 при формировании длинноэкспозиционного изображения позволяет говорить о практически изопланарных искажениях даже при достаточно сильной турбулентности на трассе наблюдения. При этом необходимо отметить, что увеличение приемной апертуры повышает скорость усреднения анизопланарных искажений.

Для восстановления структуры объекта из его изображения использовалась стандартная процедура на основе быстрого преобразования Фурье FT :

$$I^{\text{rec}}(\mathbf{r}) = FT^{-1} \left[\frac{FT[I_{\text{im}}(\mathbf{r})]}{FT[PSF(\mathbf{r})]} \right], \quad (1)$$

где $I_{\text{im}}(\mathbf{r})$ – искаженное изображение; PSF – подобранный ФРТ. Не будем уделять внимание способу определения ФРТ, поскольку цель настоящей работы – сравнительный анализ формирования изопланарно искаженных изображений традиционными и многоапертурными системами наблюдения. Отметим лишь, что в обоих случаях использовались однотипные ФРТ гауссова или степенного вида.

На рис. 2 приведены результаты восстановления искаженных изображений, полученных при разном времени экспозиции. Видно, что восстановление короткоэкспозиционного изображения таким методом позволяет увеличить его контраст, однако практически не улучшает идентификацию самого объекта: местами полосы остаются неразличимыми (рис. 2, *a*). При увеличении времени экспозиции (числа псевдослучайных короткоэкспозиционных изображений, по которым выполняется усреднение) неоднородность искажений уменьшается (рис. 2, *б–г*). При этом кроме повышения контраста объекта существенно повышается возможность идентификации его мелких деталей, что увеличивает разрешающую способность системы наблюдения.

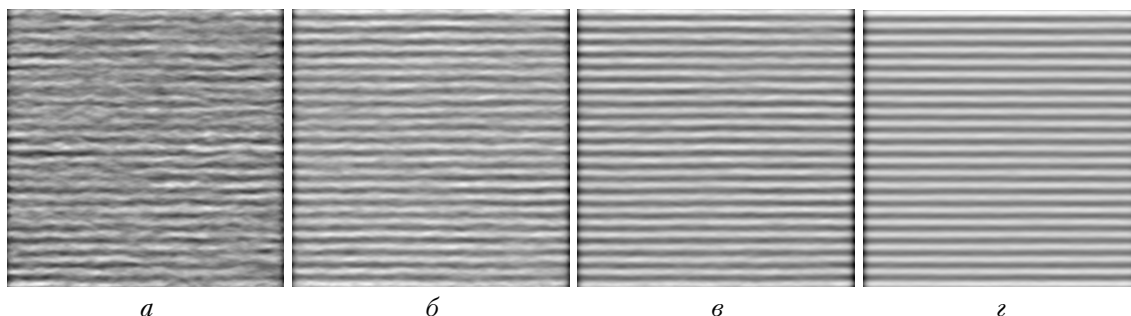


Рис. 1. Влияние времени экспозиции на характеристики изображения объекта с периодической структурой в условиях анизопланатизма турбулентности. Дистанция наблюдения $z = 0,05ka_t^2$; $D/r_0 = 9,6$, $D = 2a_t$, a_t – радиус приемной апертуры, r_0 – радиус Фрида; размерность ПЗС-матрицы $N_{\text{pix}} = 512 \times 512$. Турбулентность моделировалась 10 равноудаленными фазовыми экранами; усреднение проводилось по 1 (*a*), 5 (*б*), 20 (*в*) и 100 (*г*) реализациям короткоэкспозиционных изображений N_{SE}

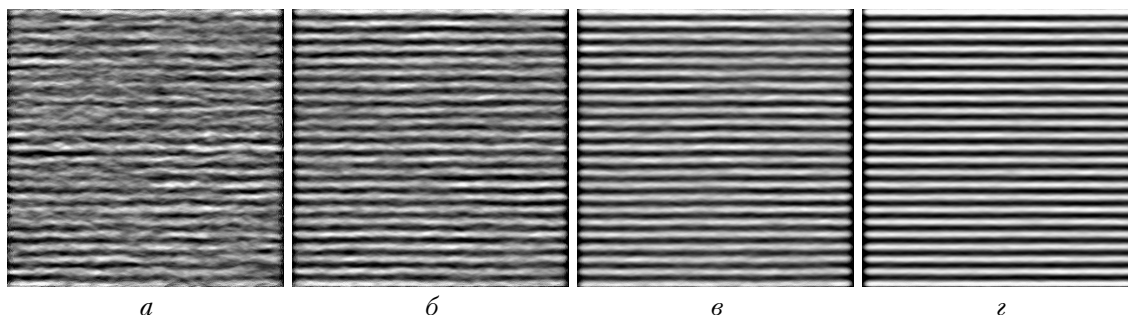


Рис. 2. Влияние времени экспозиции на эффективность восстановления структуры объекта в условиях анизопланатизма турбулентности; условия аналогичны условиям рис. 1

Можно отметить, что на основе использования такого подхода уже разработан ряд систем наблюдения, показавших свою эффективность в разных погодных условиях [4, 11]. Однако общим недостатком подобных систем является невозможность наблюдения за динамическими сценами.

2. Формирование и коррекция изопланарно искаженных изображений многоапертурных систем

Если при использовании традиционной системы с одной фокусирующей линзой (системой линз вдоль оптической оси) на ПЗС-матрице формируется единственное изображение наблюдаемого объекта, то в многоапертурной системе анализируемого типа формируется ряд изображений, количество которых определяется числом приемных субапертур [9, 10]. Под синтезированным короткоэкспозиционным изображением многоапертурной системы будем понимать сумму (наложение) короткоэкспозиционных субизображений с коррекцией случайных турбулентных смещений субизображений относительно друг друга [7, 8]. Как и в случае традиционной системы с одной апертурой, под длинноэкспозиционным изображением будем понимать сумму короткоэкспозиционных турбулентных неоднородностей, полученных для независимых реализаций.

На рис. 3 приведена схема формирования изображений в многоапертурной системе в условиях анизопланатизма турбулентности. Видно, что соседними приемными субапертурами перехватывается

рассеянное объектом излучение, прошедшее через одни и те же турбулентные неоднородности, расположенные около объекта, и через абсолютно некоррелированные неоднородности, расположенные около приемной системы. Неоднородности среды распространения, расположенные посередине между наблюдаемым объектом и приемной апертурой, частично «участвуют» в искажениях субизображений, сформированных соседними субапертурами.

В этом случае синтезированное изопланарно искаженное изображение формируется усреднением субизображений по пространству приемных субапертур. При этом хорошо усредняются турбулентные искажения, вызванные некоррелированными неоднородностями вблизи приемной системы, а те, что вызваны турбулентностью между приемником и объектом, усредняются частично. Важно отметить, что при формировании изображений в турбулентной среде чем ближе к приемной системе расположен слой неоднородностей, тем более сильные и крупномасштабные искажения он вносит в изображения [12, 13].

Таким образом, получается, что при использовании многоапертурных систем синтезированные короткоэкспозиционные изображения характеризуются хорошим усреднением наиболее сильных и крупномасштабных искажений. При этом компенсация смещений субизображений друг относительно друга представляет собой аналог адаптивной фазовой коррекции, компенсирующей средние наклоны волнового фронта в пределах размера субапертур [7, 8, 14]. Однако при решении обратной задачи восстановления синтезированного таким образом короткоэкспозиционного изображения всегда будут присутствовать остаточные мелкомасштабные искажения,

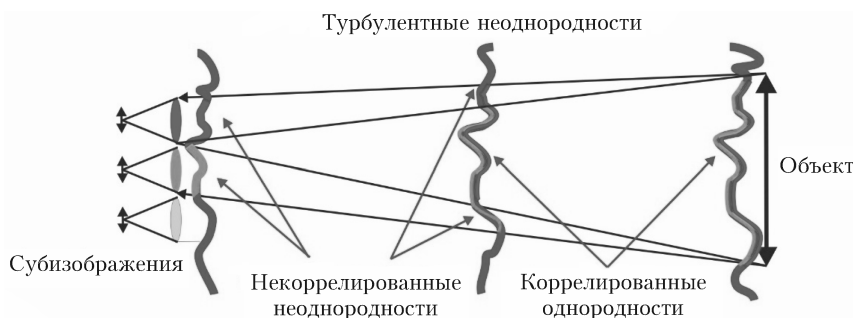


Рис. 3. Схема формирования изображений в многоапертурной системе в условиях анизопланатизма турбулентности

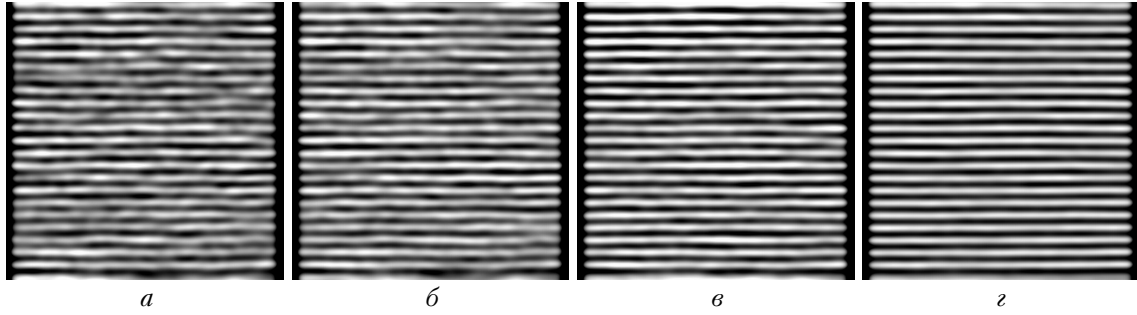


Рис. 4. Восстановленное изображение гармонического периодического объекта при использовании матрицы из 64 субапертур для $N_{SE} = 1$ (а); 2 (б); 5 (в); 20 (г) короткоэкспозиционных реализаций, используемых при синтезировании изображения. Условия наблюдения аналогичны рис. 1, размерность каждого субизображения и синтезированного изображения $N_{pix} = 512 \times 512$; радиус субапертуры $a_{sub} = a_r/8$

вызванные турбулентными неоднородностями на среднем участке трассы наблюдения. Для устранения этих мелкомасштабных искажений также можно использовать упомянутый в прошлом разделе длинноэкспозиционный подход (рис. 4).

Из рис. 4 видно, что даже при использовании короткоэкспозиционного изображения, синтезированного в многоапертурной системе, метод обратной свертки позволяет идентифицировать объект заметно лучше, чем в случае одноапертурной системы (см. рис. 2, а). При усреднении синтезированного изображения по нескольким коротким экспозициям наблюдается заметное улучшение качества восстановленного изображения.

3. Сравнение одноапертурного и многоапертурного подходов

Далее рассмотрим разницу в формировании и коррекции изображений негармонического объекта.

На рис. 5 показаны характерные результаты восстановления изображений, сформированных одно- и многоапертурной системами в турбулентной атмосфере. Видно, что у изображения, синтезированного в многоапертурной системе $I_{MA, synt}$, более сильное дифракционное размытие, чем у изображения I_{SA} , сформированного в одноапертурной системе большого размера. Также можно отметить, что субизображения $I_{MA, sub}$, из которых синтезируется изображение $I_{MA, synt}$, характеризуются более сильным анизопланатизмом искажений. Это связано с тем, что в данном случае интегрирование оптического сигнала, формирующего субизображение, происходит по существенно меньшей площади субапертуры, чем в случае одноапертурной системы.

Восстановленное синтезированное короткоэкспозиционное изображение $I_{MA, SE}^{rec}$ имеет более высокое разрешение по сравнению с восстановленным изображением $I_{SA, SE}^{rec}$ одноапертурной системы. При этом остаточные искажения, наблюдаемые в центральной

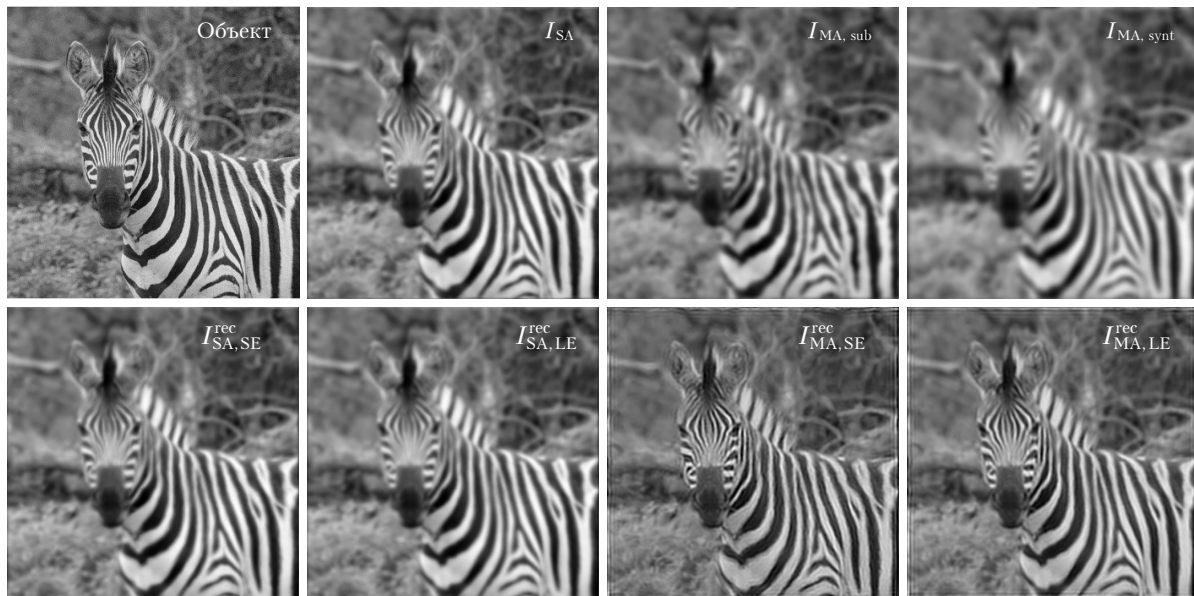


Рис. 5. Объект и его короткоэкспозиционные изображения, сформированные одноапертурной I_{SA} и многоапертурной ($I_{MA, sub}$ — субизображение, $I_{MA, synt}$ — синтезированное изображение) системами (верхний ряд); восстановленные изображения одноапертурной I_{SA}^{rec} и многоапертурной I_{MA}^{rec} систем (нижний ряд); индекс SE соответствует короткой экспозиции, LE — длинной экспозиции, сформированной при усреднении по пяти независимым реализациям случайно $z = 0,1ka_r^2$, $D/r_0 = 10$

части объекта, начинают устраняться в длинноэкспозиционном многоапертурном изображении $I_{MA,SE}^{rec}$ при усреднении всего по нескольким реализациям турбулентных неоднородностей. Можно отметить, что при такой же экспозиции улучшения качества восстановленного изображения $I_{SA,SE}^{rec}$ одноапертурной системы практически не наблюдается.

Результаты численного моделирования показали, что в большинстве случаев заметное улучшение качества восстановленного изображения одноапертурной системы наблюдения при синтезировании длинноэкспозиционных изображений происходит при числе независимых коротких экспозиций $N_{SE} > 100$. В то же время увеличение числа короткоэкспозиционных синтезированных изображений многоапертурной системы до 10 позволяет существенно улучшить качество коррекции.

Для количественной оценки качества изображений часто используют их частотно-контрастную характеристику. В нашем случае при некорректном решении обратной задачи восстановления изображения контраст скорректированного изображения может существенно увеличиться, даже несмотря на то, что в результате восстановленное изображение будет сильно отличаться от оригинала. В связи с этим в качестве критерия эффективности коррекции изображения методом обратной свертки мы будем использовать коэффициент взаимной корреляции

$$R(N_{SE}) = \frac{\sum_{i=1}^{N_{pix}} I_{LE}^{rec}(\mathbf{r}_i) I_{obj}(\mathbf{r}_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N_{pix}} [I_{LE}^{rec}(\mathbf{r}_i)]^2 \sum_{i=1}^{N_{pix}} I_{obj}^2(\mathbf{r}_i)}}, \quad (2)$$

где N_{SE} — число независимых реализаций турбулентных неоднородностей, по которым выполнено усреднение при формировании длинноэкспозиционных изображений $I_{LE}(\mathbf{r})$; I_{obj} — неискаженное изображение объекта.

Рис. 6 позволяет сравнить эффективность использования длинной экспозиции для борьбы с анизопланарными искажениями в случае одно- и многоапертурных систем наблюдения.

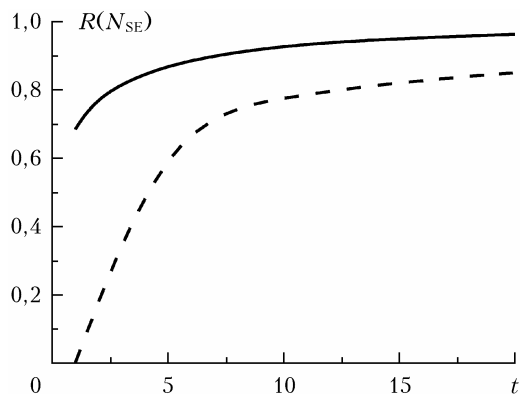


Рис. 6. Зависимость коэффициента корреляции восстановленного и неискаженного изображения от числа короткоэкспозиционных кадров t для многоапертурной (сплошная кривая) и одноапертурной (штриховая кривая) систем

Существенное уменьшение числа короткоэкспозиционных изображений при использовании многоапертурных систем наблюдения можно объяснить тем, что в данном случае наиболее сильные крупномасштабные искажения удается скорректировать при сложении субизображений для каждой короткой экспозиции. А накопление нескольких коротких экспозиций позволяет дополнительно избавиться от мелкомасштабных остаточных искажений.

Заключение

Таким образом, можно сделать вывод, что использование многоапертурных систем наблюдения для компьютерной коррекции турбулентных искажений в условиях анизопланатизма характеризуется неполным усреднением мелкомасштабных искажений. Однако такой подход позволяет существенно сократить время экспозиции (накопления короткоэкспозиционных изображений) при синтезировании изопланарно искаженных изображений. Это связано с тем, что основные (наиболее масштабные и амплитудные) искажения хорошо усредняются при синтезировании изображений за время короткой экспозиции, соответствующей случаю «замороженной» турбулентной среды. Для коррекции остаточных мелкомасштабных искажений требуется на порядок меньше времени, чем в случае синтезирования длинноэкспозиционных изображений с помощью одноапертурной системы наблюдения.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект №18-79-00179).

1. *Ivanov M., McGaughey D.* Image reconstruction by aperture diversity blind deconvolution // Proc. AMOS Tech. Conf. 12–15 September, 2007. Wailea, Maui, Hawaii. P. E78.
2. *Huebner C.S., Greco M.* Blind deconvolution algorithms for the restoration of atmospherically degraded imagery: A comparative analysis // Proc. SPIE. 2008. V. 7108. P. 71080M-1–12.
3. *Schulz T.* Multiframe blind deconvolution of astronomical images // J. Opt. Soc. Am. A. 1993. V. 10, N 5. P. 1064–1073.
4. *Averin A.P., Morozov Yu.B., Pryanichnikov V.S., Tyapin V.V.* Computer correction of turbulent distortions of image of extended objects on near-Earth paths // Quant. Electron. 2011. V. 41, N 5. P. 475–478.
5. *Zhu X., Milanfar P.* Image reconstruction from videos distorted by atmospheric turbulence // Proc. SPIE. 2010. V. 7543. P. 75430S-1–8.
6. *Hope D.A., Jefferies S.M., Hart M., Nagy J.G.* High-resolution speckle imaging through strong atmospheric turbulence // Opt. Express. 2016. V. 24, N 11. P. 12116–12129.
7. *Дудоров В.В., Еремина А.С.* Компьютерная коррекция турбулентных искажений некогерентных оптических изображений при использовании многоапертурных систем наблюдения // Оптика атмосф. и океана. 2018. Т. 31, № 2. С. 95–102.
8. *Dudorov V.V., Eremina A.S.* Computer correction of turbulent distortions of incoherent optical images using multi-aperture systems // Proc. SPIE. 2018. V. 10787. P. 107870E-1–9.

9. *Miller N.J., Haus J.W., McManamon P.F., Shemano D.* Multi-aperture coherent imaging // *Proc. SPIE.* 2009. V. 8052. P. 805207-1–12.
10. *Carles G., Muyo G., Bustin N., Wood A., Harvey A.R.* Compact multi-aperture imaging with high angular resolution // *J. Opt. Soc. Am. A.* 2015. V. 32, iss. 3. P. 411–419.
11. *Imaging through volume turbulence (IVT).* URL: <https://www.radiantsolutions.com/capabilities/enrich/sensor-data-enrichment> (last access: 6.04.2020).
12. *Дудоров В.В., Еремина А.С.* Определение поперечной составляющей скорости ветра на основе анализа видеоряда изображений удаленных объектов. Часть 2. Смещение объема турбулентной среды // *Оптика атмосф. и океана.* 2017. Т. 30, № 8. С. 682–690; *Dudorov V.V., Eremina A.S.* Retrieval of crosswind velocity based on the analysis of remote object images: Part 2 – Drift of turbulent volume // *Atmos. Ocean. Opt.* 2017. V. 30, N 6. P. 596–603.
13. *Dudorov V.V., Eremina A.S.* Visualization of the wind drift of turbulent inhomogeneities // *Proc. SPIE.* 2018. V. 10787. DOI: 10.1117/12.2502461.
14. *Лукин В.П., Ботыгина Н.Н., Антошкин Л.В., Борзилов А.Г., Емалеев О.Н., Коняев П.А., Ковадло П.Г., Колобов Д.Ю., Селин А.А., Соин Е.Л., Шиховцев А.Ю., Чупраков С.А.* Многокаскадная система коррекции изображения для Большого солнечного вакуумного телескопа // *Оптика атмосф. и океана.* 2019. Т. 32, № 5. С. 404–413; *Lukin V.P., Botygina N.N., Antoshkin L.V., Borzilov A.G., Emaleev O.N., Konyaev P.A., Kovadlo P.G., Kolobov D.Yu., Selin A.A., Soin E.L., Shikhovtsev A.Yu., Chuprakov S.A.* Multi-cascade image correction system for the Large solar vacuum telescope // *Atmos. Ocean. Opt.* 2019. V. 32, N 5. P. 597–606.

V.V. Dudorov, A.S. Nasonova. **Comparison of post-detection correction of short- and long-exposure images formed by commonly used and multi-aperture observation systems in a turbulent atmosphere.**

The retrieval efficiency is analyzed for atmospheric turbulence distorted images formed by single- and multi-aperture systems. Based on numerical simulation it is shown that the use of multi-aperture observation systems for computer correction of atmospheric distortions under anisoplanatism can significantly reduce the exposure time. In this case, the main distortions are well corrected when imaging for a short exposure time, which corresponds to the case of a “frozen” turbulent medium. Correction of residual small-scale distortions requires an order-of-magnitude shorter time than in the case of long-exposure imaging with the use of common single-aperture observation systems.