

УДК 535.317.1, 535.361.2

Компьютерная коррекция турбулентных искажений некогерентных оптических изображений при использовании многоапертурных систем наблюдения

В.В. Дудоров, А.С. Еремина*

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

Поступила в редакцию 11.09.2017 г.

На основе численного моделирования исследованы возможности повышения эффективности работы оптических многоапертурных систем наблюдения в турбулентной атмосфере. Проанализированы особенности формирования синтезированного изображения, представляющего собой сумму (наложение) изображений, полученных на каждой отдельной субапертуре, при наличии турбулентных искажений. Приведены результаты анализа качества изображений, синтезированных матрицей $N \times N$ субапертур ($N = 5-10$). Показано, что при использовании большого числа субапертур турбулентные искажения в синтезированном изображении, полученном с учетом компенсации смещений субизображений на каждой отдельной субапертуре, являются изопланарными в широком диапазоне атмосферных условий, что позволяет существенно улучшить качество изображения методами компьютерной коррекции. При этом существует оптимальный размер субапертуры, определяемый главным образом параметром Фрида, характеризующим степень турбулентных искажений.

Ключевые слова: многоапертурные системы наблюдения, турбулентная атмосфера, компьютерная обработка изображений; multiaperture systems, turbulent atmosphere, computational imaging.

Введение

Известно, что при наблюдении за удаленными объектами через атмосферу в условиях анизопланатизма турбулентности использование методов адаптивной оптики весьма ограничено [1, 2]. В связи с этим для ситуаций, когда угловой размер объекта существенно превышает угол изопланатизма турбулентности, что характерно для горизонтальных трасс наблюдения, для коррекции турбулентных искажений также используют методы постдетекторной обработки изображений [3–10]. Один из наиболее эффективных подходов компьютерной коррекции основан на решении обратной задачи восстановления структуры объекта из его размытого изображения [11]. При этом для корректного решения обратной задачи в условиях анизопланатизма турбулентности традиционно используют накопление изображений во времени [3–5, 8, 9]. Недостатком такого способа формирования изопланарно искаженных изображений является невозможность анализа динамически изменяющихся сцен наблюдения.

Альтернативой длинноэкспозиционному методу формирования изопланарно искаженных изображений стал подход, основанный на разделении приемной апертуры [10]. Фактически такой подход реализуется в корреляционном датчике волнового фронта

Шака–Гартмана [9], а также в многоапертурных системах, широко используемых для повышения качества когерентных изображений в активных системах наблюдения [12]. При большом количестве субапертур, формирующих собственные субизображения, синтезированное изображение, являющееся их суммой, будет изопланарным в связи с усреднением турбулентных искажений по количеству элементов разделенной апертуры (субапертур) [13]. Это позволяет формировать изображения, допускающие корректное решение обратной задачи восстановления объекта, за существенно меньшее время, чем в случае накопления изображений во времени.

Целью настоящей работы является анализ эффективности использования многоапертурных систем наблюдения для коррекции изображений в условиях анизопланатизма турбулентности. На рис. 1 представлена схема формирования изображения при использовании многоапертурной системы наблюдения в сравнении с традиционной. 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. Под синтезированным изображением будем понимать сумму (наложение) полученных субизображений с учетом случайных турбулентных смещений фрагментов изображений [8].

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

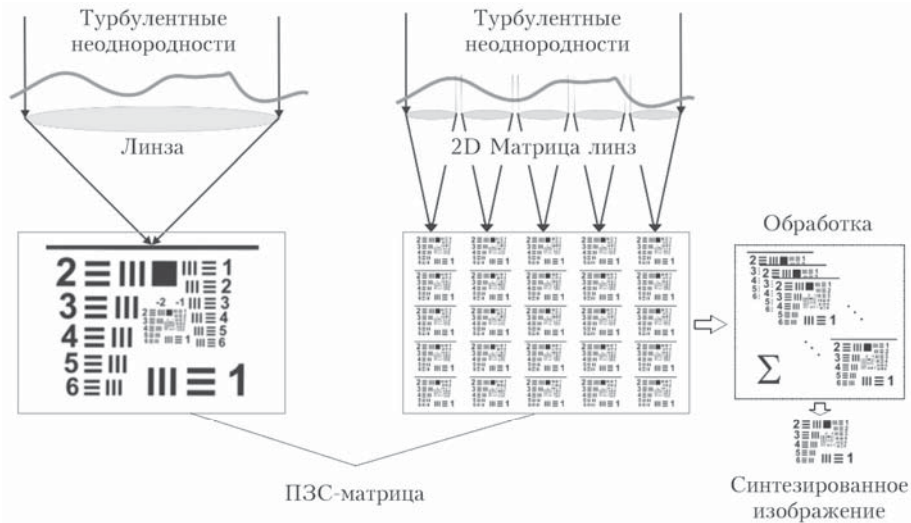


Рис. 1. Схема формирования изображения при использовании традиционной (слева) и многоапертурной (справа) систем наблюдения

В этом случае для формирования изопланарно искаженного изображения, допускающего корректное решение обратной задачи с целью восстановления структуры объекта, требуется время, равное времени экспозиции одного кадра изображения. Кроме того, такой подход позволяет в пределах каждой субапертуры без использования адаптивной оптики компенсировать локальные наклоны волнового фронта поля, пришедшего от объекта и искаженного турбулентными неоднородностями воздуха, что является существенным преимуществом по сравнению с формированием изображения одной апертурой большого размера.

Анализ эффективности коррекции изображений, синтезированных многоапертурной системой наблюдения, выполнен на основе численного моделирования для широкого диапазона условий наблюдения. Время формирования синтезированных изображений соответствовало короткой экспозиции (условиям «замороженности» турбулентности).

Метод моделирования

Моделирование изображения некогерентного объекта выполнено на основе решения уравнения переноса излучения для функции яркости B [14] с использованием гауссовой аппроксимации апертурной функции пропускания приемного телескопа радиуса a_t [15, 16]:

$$W(\mathbf{r}) = e^{-\frac{r^2}{2a_t^2}} \quad (1)$$

($\mathbf{r} = \{x, y\}$ — радиус-вектор в плоскости, перпендикулярной оптической оси).

В данном случае распределение интенсивности поля в плоскости изображения $z = z_{im}$

$$I(\mathbf{r}, z = z_{im}, t) = \frac{2k^2 a_t^2}{z_{im}^2} \int_{-\infty}^{\infty} d\mathbf{R} e^{-\frac{R^2}{a_t^2}} \times$$

$$\times \int_{-\infty}^{\infty} d\mathbf{\kappa} e^{-\kappa^2 a_t^2} B(\mathbf{R}, \mathbf{\kappa}_r - \mathbf{\kappa}, z = 0, t), \quad (2)$$

где $1/z_{im} = 1/F_t + 1/z_{obj}$, F_t — фокусное расстояние линзы приемного телескопа, z_{obj} — плоскость расположения наблюдаемого объекта; $\mathbf{\kappa}_r = k(\mathbf{R}/z_{obj} + \mathbf{r}/z_{im})$, k — волновое число.

Граничные условия для решения уравнения переноса для объекта с шероховатой поверхностью имеют вид [14]:

$$B(\mathbf{R}, \mathbf{\kappa}, z = z_{obj}, t) = cT(\mathbf{R})I_0. \quad (3)$$

Здесь T — коэффициент отражения поверхности объекта; I_0 — интенсивность равномерно подсвечивающего объект некогерентного излучения (солнечного света), абсолютное значение которой несущественно для наших исследований в связи с пренебрежением шумами в приемной системе и представлением результатов в относительных единицах измерения; $c = 1/2\pi$.

Турбулентная среда моделировалась методом фазовых экранов со спектром флуктуаций показателя преломления фон Кармана следующего вида:

$$\Phi_n(\mathbf{\kappa}) = 0,033C_n^2(\kappa^2 + \kappa_0^2)^{-11/6} e^{-\kappa^2/\kappa_m^2}, \quad (4)$$

где $\kappa_m = 5,92/l_0$; $\kappa_0 = 2\pi/L_0$; l_0 — внутренний, L_0 — внешний масштабы турбулентности. Структурная характеристика показателя преломления C_n^2 предполагалась постоянной на всей трассе наблюдения. При этом для повышения эффективности расчетных алгоритмов при решении уравнения переноса использовалась не сама фаза $S(\mathbf{R}, z, t) = kn(\mathbf{R}, z, t)\Delta z$, где n — возмущение показателя преломления среды; Δz — шаг расчетной сетки по эволюционной переменной z , а ее градиенты по поперечным координатам $\nabla_{\mathbf{R}} S(\mathbf{R}, z, t) = k\Delta z \nabla_{\mathbf{R}} n(\mathbf{R}, z, t)$ [17–20].

Результаты и обсуждение

Функция размытия точки синтезированного изображения

На рис. 2 представлено изображение объекта, сформированное традиционной одноапертурной системой радиуса a_t , а также тремя случайно выбраными субапертурами (из матрицы 10×10 субапертур) радиуса $0,1a_t$. Выбранный тестовый объект представляет собой матрицу 5×5 точек. Поэтому его изображения характеризуют функцию размытия точки (ФРТ) в разных частях наблюдаемого объекта.

Видно, что данные условия наблюдения характеризуются достаточно сильным анизопланатизмом турбулентности — ФРТ в разных частях объекта не коррелированы. Можно заметить, что в сравнении с традиционным изображением, сформированным одной крупной апертурой (рис. 2, *а*), субизображения многоапертурной системы характеризуются более сильным дифракционным размытием (из-за малого размера субапертур), однако более узкой эффективной шириной ФРТ. Это объясняется тем, что в многоапертурной системе ширина турбулентной ФРТ для каждой субапертуры не зависит от искажений волнового фронта на соседних субапертурах (см. рис. 1), в то время как при формировании изображения одной крупной апертурой турбулентные искажения с масштабами порядка размера субапертуры и более приводят к существенному размытию. Локальные наклоны волнового фронта, усредненные по площади отдельной субапертуры, приводят к смещению всего субизображения. Таким образом, просто смещая субизображения при их суммирова-

нии, мы можем компенсировать локальные наклоны волнового фронта, усредненные по малой площади субапертур.

На рис. 3 приведены изображение объекта, сформированное традиционной одноапертурной системой, а также синтезированные изображения при простом суммировании субизображений и при компенсации смещений субизображений по центральной части объекта или при разбиении всего изображения на блоки. Вектор смещения субизображений (блоков изображения) относительно друг друга определялся на основе расчета функции взаимной корреляции изображений центрального элемента объекта (соответствующих блоков). При компенсации смещения субизображений ФРТ, во-первых, заметно уже, чем без компенсации, а во-вторых, является изопланарной. Лучше всего это видно на рис. 3, *в*, где центральная точка объекта, по которой производилось смещение субизображений всей матрицы точек, существенно отличается от остальных. Синтезированное изображение на рис. 3, *г* по аналогии с работой [8] получено при разбиении всего изображения на 25 (5×5) квадратных блоков и дальнейшей компенсации смещений каждого отдельного блока. Здесь ФРТ для всех блоков аналогичны ФРТ в центральной части синтезированного изображения, представленного на рис. 3, *в*.

Восстановление структуры объекта

Изопланарность ФРТ в смысле ее однородности по всей области изображения объекта позволяет выразить изображение $I_{\text{im}}(\mathbf{r})$ (распределение интенсивности излучения в плоскости изображения) через

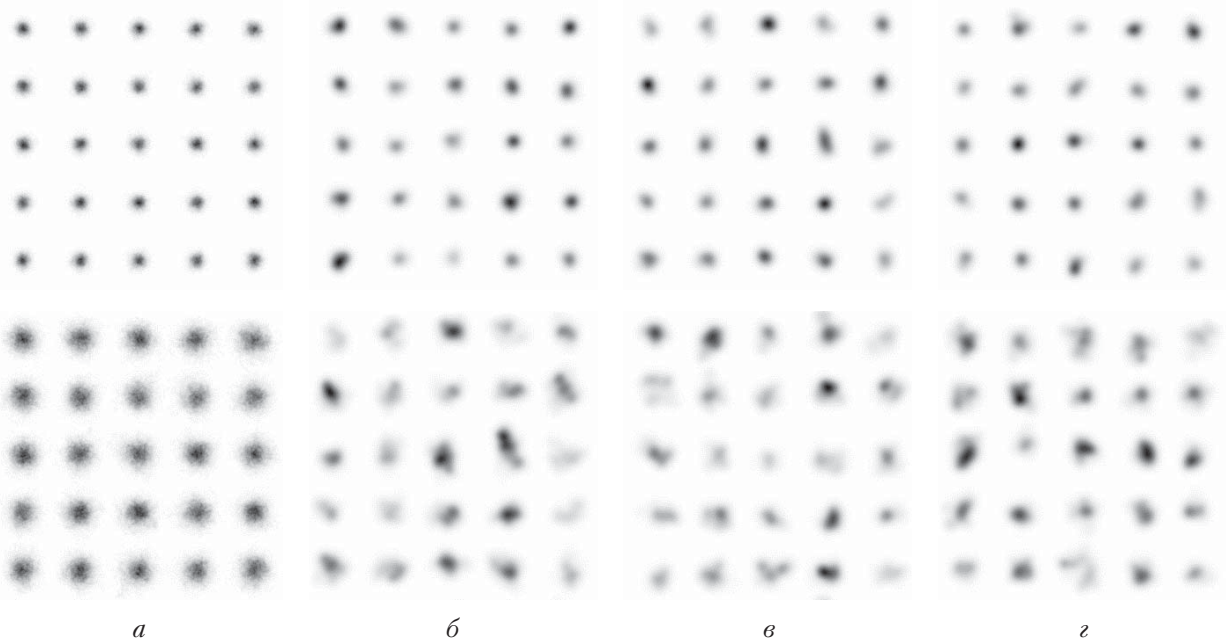


Рис. 2. Изображения объекта (матрицы 5×5 точек), сформированные одной апертурой радиуса a_t (*а*) и тремя соседними субапертурами радиуса $a_{\text{sub}} = 0,1a_t$ (*б–г*). Расстояние до объекта $z = 0,05ka_t^2$; расстояние между соседними точками $l = 1,2a_t$; $D/r_0 = 4$ (вверху), 8 (внизу); $D = 2a_t$

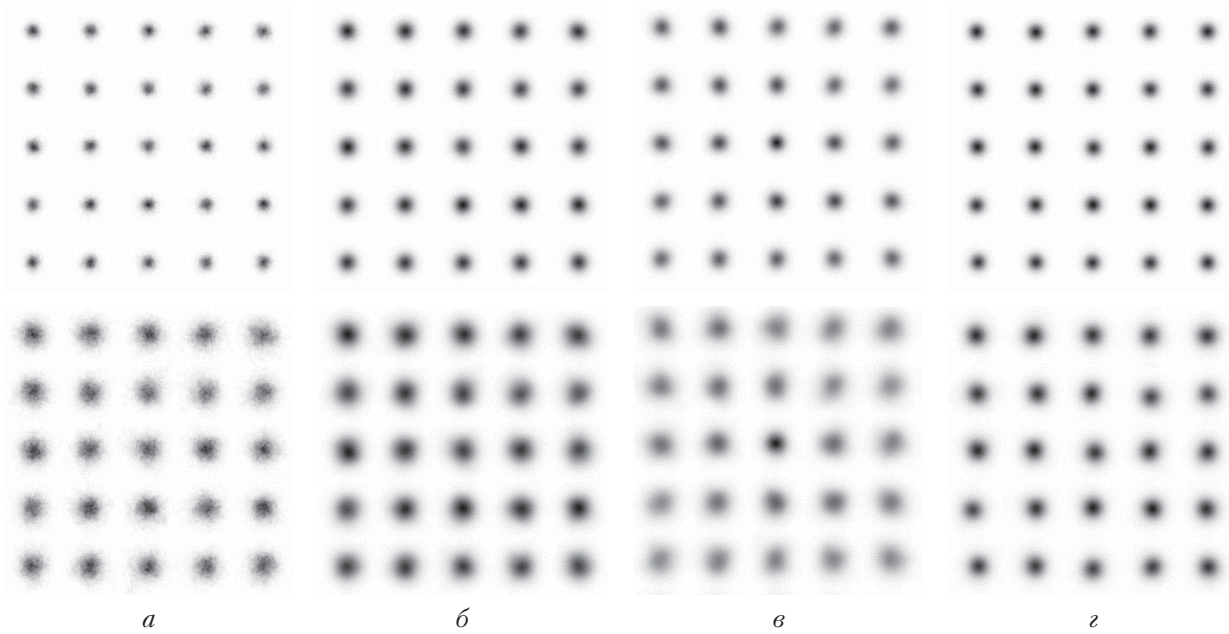


Рис. 3. Изображение объекта, сформированное однопертурной системой (*a*); синтезированные изображения без (*б*) и с компенсацией смещений по центральной части объекта (*в*), а также при разбиении всего изображения на 25 (5×5) участков (*г*). Условия как на рис. 2

функцию объекта $I_{\text{obj}}(\mathbf{r})$ (распределение интенсивности излучения, диффузно рассеянное поверхностью объекта) и функцию размытия точки $PSF(\mathbf{r})$:

$$I_{\text{im}}(\mathbf{r}) = I_{\text{obj}}(\mathbf{r}) \otimes PSF(\mathbf{r}) \quad (5)$$

(\otimes – операция свертки).

Операция восстановления структуры объекта из его изображения на основе быстрого преобразования Фурье FT выглядит следующим образом:

$$I_{\text{obj}}^{\text{rec}}(\mathbf{r}) = FT^{-1} \left[\frac{FT[I_{\text{im}}(\mathbf{r})]}{FT[PSF(\mathbf{r})]} \right]. \quad (6)$$

При синтезировании изображения с компенсацией смещения субизображений (блоков субизображений) возможно решить обратную задачу восстановления объекта путем подбора некоторой сглаженной ФРТ, характеристики которой можно оценить на основе анализа атмосферных условий. На рис. 4 представлены результаты восстановления тестового объекта при использовании $PSF(\mathbf{r}) = \exp(-r^2/a^2)$,

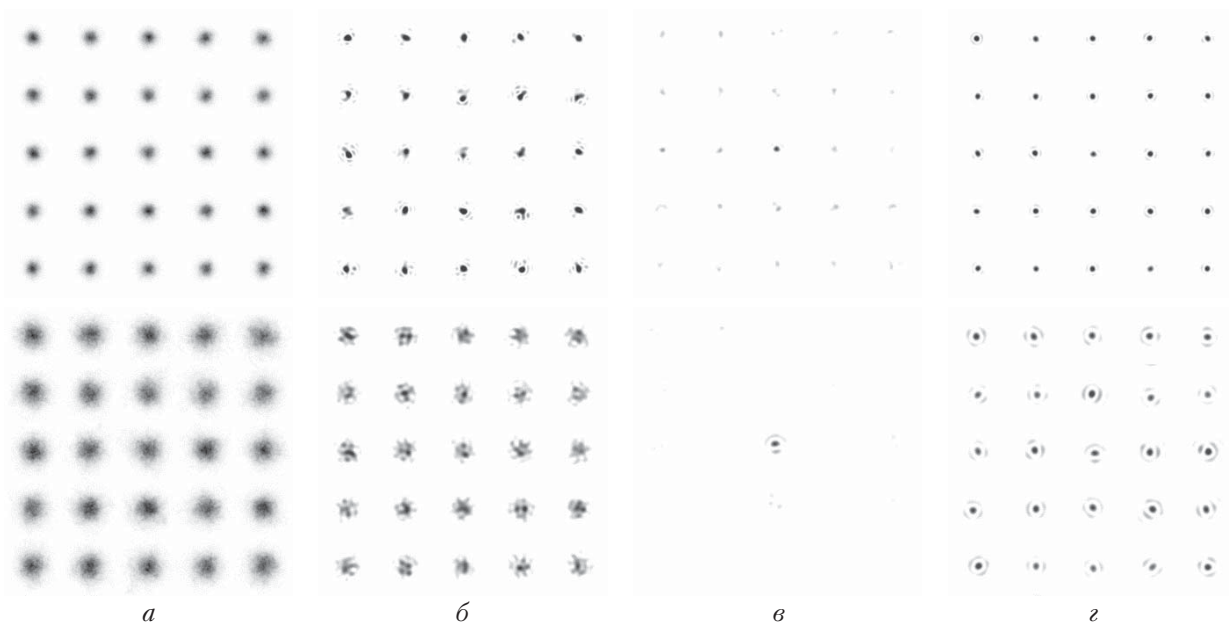


Рис. 4. Изображение объекта, сформированное однопертурной системой (*a*); восстановленный объект без (*б*) и с компенсацией смещений по центральной части объекта (*в*), а также при разбиении всего изображения на 25 (5×5) участков (*г*). Условия как на рис. 2

где a — опорный размер субапертуры. Размер a в данном случае выбирался из условия минимизации эффективного размера центральной точки восстановленного объекта.

Остаточные искажения элементов объекта (размер восстановленных точек) при компенсации смещений субизображений (рис. 4, *в*) существенно меньше как остаточных искажений восстановленного объекта без компенсации смещений (рис. 4, *б*), так и ФРТ одноапертурной системы (рис. 4, *а*). Можно отметить, что в условиях сильного анизопланатизма турбулентности при компенсации смещения субизображений восстановление структуры объекта происходит только в области, по которой определялся вектор смещения. На верхнем рис. 4, *в* ($D/r_0 = 4$) видно, что центральная точка восстанавливается практически идеально, а остальные точки — заметно хуже. При более сильных искажениях (нижний рис. 4, *в*, $D/r_0 = 8$) восстановление центральной точки происходит с некоторой ошибкой, а периферийные элементы объекта не восстанавливаются. Следовательно, для наилучшего восстановления структуры объекта на основе рассматриваемого подхода необходимо разбивать анализируемую область на независимые участки и выполнять компенсацию смещений аналогично [8] (рис. 4, *з*).

Оценка эффективности восстановления структуры объекта

Для количественной оценки эффективности восстановления структуры объекта из синтезированных изображений многоапертурной системы можно использовать частотно-контрастную характеристику (ЧКХ), определяемую модулем оптической передаточной функции [21]. В нашем случае мы анализировали ЧКХ восстановленного изображения гармонического объекта типа $T(\mathbf{r}, \nu) = 0,5[1 + \cos(2\pi\nu x)]$. Классическое определение ЧКХ изображения такого объекта совпадает с его контрастом:

$$k'(\nu) = \frac{\max I_{\text{obj}}^{\text{rec}}(\mathbf{r}, \nu) - \min I_{\text{obj}}^{\text{rec}}(\mathbf{r}, \nu)}{\max I_{\text{obj}}^{\text{rec}}(\mathbf{r}, \nu) + \min I_{\text{obj}}^{\text{rec}}(\mathbf{r}, \nu)} \quad (7)$$

(ν — пространственная частота).

Стоит отметить, что, несмотря на то что синтезированное изображение получено при усреднении по достаточно большому числу субапертур, не удается полностью избавиться от анизопланатизма искажений (неоднородности по площади объекта). При компенсации неизопланарных турбулентных искажений определение (7) будет характеризоваться зависимостью от выбранной реализации турбулентных неоднородностей, а также от положения анализируемой области изображения. Это затрудняет сравнительный анализ эффективности рассматриваемого подхода в различных условиях наблюдения. С целью устранения данного недостатка при наблюдении в ус-

ловиях сильного анизопланатизма турбулентности для оценки эффективности восстановления структуры объекта мы будем использовать следующую характеристику:

$$k(\nu) = \sqrt{\frac{2}{N_{\text{pix}} - 1} \sum_{i=1}^{N_{\text{pix}}} [I_{\text{obj}}^{\text{rec}}(\mathbf{r}_i, \nu) - \overline{I_{\text{obj}}^{\text{rec}}(\mathbf{r}_i, \nu)}]^2}, \quad (8)$$

где N_{pix} — число пикселей в анализируемом изображении. Такое определение ЧКХ совпадает с определением (7) для изопланарных искажений гармонического объекта. В случае анизопланатизма определение (8) позволяет рассчитать средний контраст изображения по всей площади наблюдаемого объекта.

На рис. 5 представлена ЧКХ изображения, сформированного одноапертурной системой, а также ЧКХ восстановленного объекта с коррекцией смещений субизображений и без нее для многоапертурной системы. Коррекция смещений выполнялась на основе анализа субизображений всего объекта размером 20 радиусов субапертуры a_{sub} , что для выбранной дистанции наблюдения соответствует 32 угловым радиусам дифракционной ФРТ. Результаты приведены для трех значений количества субапертур N_{sub} . При этом полагалось, что размер одноапертурной системы совпадает с общим размером синтезированной апертуры $a_t = a_{\text{sub}} N_{\text{sub}}$.

Видно, что решение обратной задачи восстановления объекта позволяет в несколько раз увеличить разрешающую способность многоапертурной системы по сравнению с одноапертурной, для которой корректное решение обратной задачи невозможно. Также можно отметить, что увеличение числа субапертур с 25 до 64 приводит к заметному увеличению значений ЧКХ. Это можно объяснить тем, что при увеличении числа субапертур синтезированное изображение становится более изопланарным, позволяя лучше восстанавливать структуру объекта. Дальнейшее увеличение числа субапертур до 100 практически не увеличивает ЧКХ в области высоких частот.

Как показали результаты численного анализа синтезированных изображений, при определении оптимальных характеристик многоапертурной системы наиболее существенным является правильный выбор размера субапертуры в зависимости от атмосферных условий наблюдения. На рис. 6 приведена характерная зависимость ЧКХ восстановленного гармонического объекта из синтезированного многоапертурной системой изображения от размера субапертуры a_{sub} .

Видно, что восстановление наиболее мелких деталей объекта, соответствующих максимальной частоте ν , происходит наиболее эффективно для субапертур несколько больших размеров (на 10–20%), чем размер субапертур, при котором наилучшим образом восстанавливаются более крупные детали (соответствующие меньшим значениям ν). Такое несущественное отличие можно объяснить особенностью анизопланарных искажений. При формировании синтезированного изображения с помощью многоапертурной системы наблюдения происходит хорошее

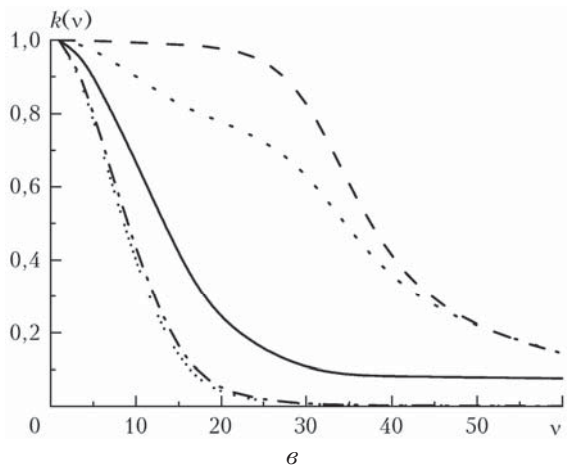
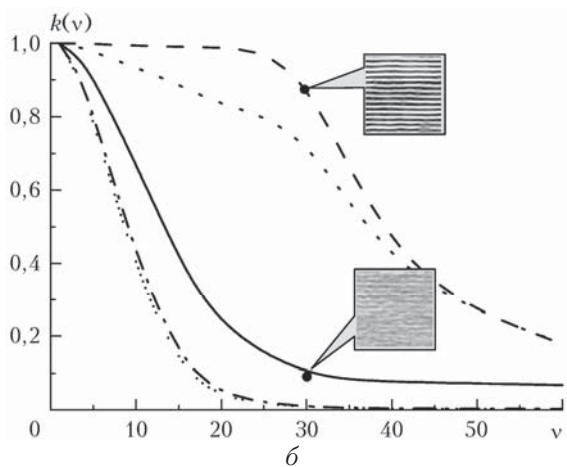
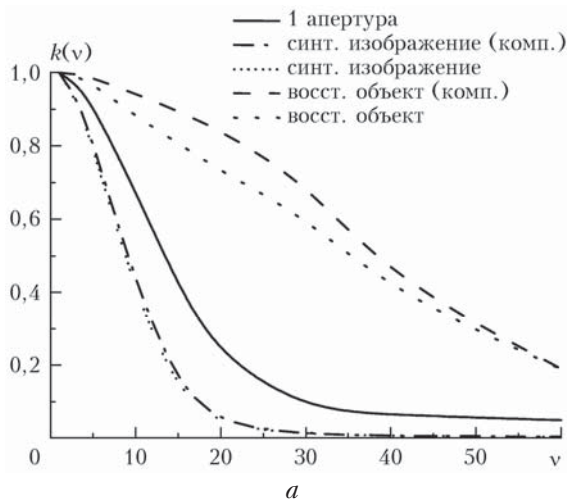


Рис. 5. Частотно-контрастная характеристика изображения (восстановленного) гармонического объекта для $N_{\text{sub}} = 5 \times 5$ (а), 8×8 (б) и 10×10 (в). Пространственная частота v выражена в количестве периодов функции \cos на размере $64z/(ka_{\text{sub}})$; дистанция наблюдения $z = 0,6ka_{\text{sub}}^2$; отношение размера синтезированной апертуры к радиусу Фрида $D/r_0 = 4,5$ (а), 7 (б), 9 (в); размер объекта $20a_{\text{sub}}$; $N_{\text{pix}} = 512$. Сплошная линия соответствует одноапертурной системе, штриховая линия – контраст изображения восстановленного объекта для многоапертурной системы с коррекцией смещения субизображений, точки – без коррекции. Фрагменты изображения гармонического объекта на рисунке (б) соответствуют указанным точкам на кривых

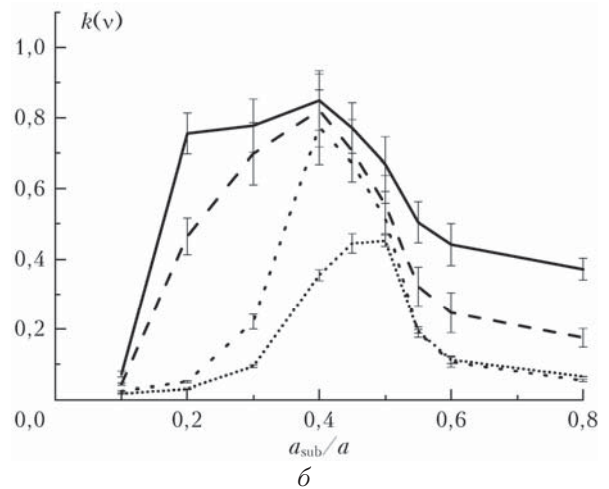
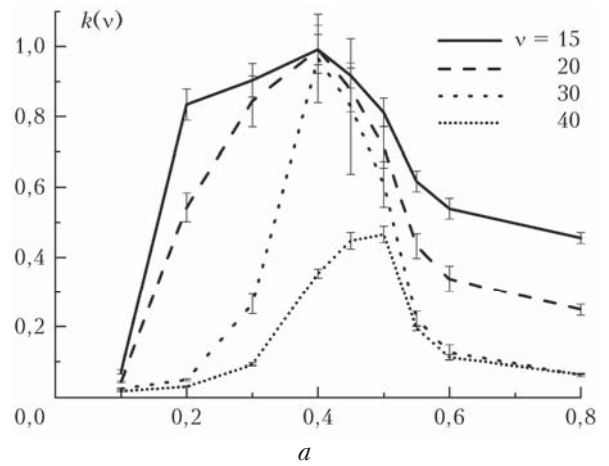


Рис. 6. Зависимость $k(v)$ от размера субапертуры a_{sub} , нормированного на параметр a , с компенсацией смещений субизображений (а) и без компенсации (б) ($z = 0,1ka^2$; $r_0/a = 0,9$; $N_{\text{sub}} = 64$). Усреднение выполнено по 20 реализациям турбулентных неоднородностей; вертикальными отрезками показано СКО

усреднение искажений, вызванных слоями турбулентности, прилегающими к системе наблюдения. Турбулентные неоднородности, находящиеся на некотором расстоянии от приемной системы, вызывают коррелированные искажения для рядом расположенных субапертур и, следовательно, при сложении субизображений усредняются не полностью. При восстановлении структуры объекта на основе выражения (6) в изображении местами остаются мелкошабные искажения (см. рис. 5, б), что сказывается главным образом на ЧКХ при больших значениях v .

Анализ результатов для умеренных турбулентных искажений, характеризующихся отношением размера синтезированной апертуры к радиусу Фрида $3 < D/r_0 < 15$, показал, что существует некоторый оптимальный размер субапертуры, позволяющий восстановить наблюдаемый объект наилучшим образом. Его значение определяется величиной радиуса Фрида и дифракционными параметрами приемной системы. В случае, когда дифракционные искажения незначительны по сравнению с турбу-

лентными, оптимальный радиус субапертуры равен примерно половине радиуса Фрида r_0 , определяющего степень турбулентных искажений.

Заключение

Анализ особенностей формирования синтезированного изображения, представляющего собой сумму (наложение) изображений, полученных на каждой отдельной субапертуре, показал, что при использовании большого числа субапертур (более 25) и коррекции смещений субизображений турбулентные искажения в синтезированном изображении являются практически изопланарными в широком диапазоне атмосферных условий. Это позволяет существенно улучшить качество изображения на основе решения обратной задачи восстановления структуры объекта из его искаженного изображения. Показано, что для условий наблюдения, характеризующихся слабыми дифракционными искажениями в сравнении с турбулентными, существует оптимальный размер субапертуры, определяемый параметром Фрида. Использование матрицы субапертур оптимального размера позволяет в несколько раз увеличить частотно-контрастные характеристики корректируемых изображений. Таким образом, подход к формированию синтезированных изображений на основе многоапертурных приемных систем и дальнейшему восстановлению структуры объекта, позволяет существенно повысить разрешающую способность систем наблюдения в условиях сильного анизопланатизма турбулентности.

1. Лукин В.П., Фортес Б.В. Адаптивное формирование пучков и изображений в атмосфере. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999. 286 с.
2. Van Eekeren A.W.M., Schutte K., Dijk J., Schweiring P.B.W., van Iersel M., Doelman N.J. Turbulence compensation: An overview // Proc. SPIE. 2012. V. 8355. P. 83550Q-1–83550Q-10.
3. 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-1–71080M-12.
4. Van Eekeren A.W.M., Kruijthof M.C., Schutte K., Dijk J., van Iersel M., Schweiring P.B.W. Patch-based local turbulence compensation in anisoplanatic conditions // Proc. SPIE. 2012. V. 8355. P. 83550T-1.
5. Zhu X., Milanfar P. Image reconstruction from videos distorted by atmospheric turbulence // Proc. SPIE. 2010. V. 7543. P. 75430S.
6. Aubailly M., Vorontsov M.A., Carhar G.W., Valley M.T. Automated video enhancement from a stream of atmospherically-distorted images: The lucky-region fusion approach // Proc. SPIE. 2009. V. 7463. P. 74630C.
7. Конаев П.А., Боровик А.В., Жданов А.А. Анализ структуры и развития вневятных вспышек по цифровым изображениям хромосферы Солнца // Оптика атмосф.

- и океана. 2015. Т. 28, № 9. С. 844–849; Konyaev P.A., Borovik A.V., Zhdanov A.A. Analysis of structure and development of spotless flares using digital images of the solar chromosphere // Atmos. Ocean. Opt. 2016. V. 29, N 1. P. 89–94.
8. Аверин А.П., Морозов Ю.Б., Пряничников В.С., Тяпин В.В. Компьютерная коррекция турбулентных искажений изображения протяженного объекта на приземных трассах // Квант. электрон. 2011. Т. 41, № 5. С. 475–478.
 9. 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.
 10. Ivanov M., McGaughey D. Image reconstruction by aperture diversity blind deconvolution // Proc. of AMOS Tech. Conf. 12–15 September, 2007. Wailea, Maui, Hawaii. P. E78.
 11. Schulz T. Multiframe blind deconvolution of astronomical images // J. Opt. Soc. Am. A. 1993. V. 10, N 5. P. 1064–1073.
 12. Miller N.J., Haus J.W., McManamon P.F., Shemano D. Multi-aperture coherent imaging // Proc. SPIE. 2009. V. 8052. P. 805207-1-12.
 13. Дудоров В.В., Еремина А.С. Возможности повышения качества искаженных турбулентными неоднородностями изображений удаленных объектов на основе использования многоапертурных систем наблюдения // Аэрозоли Сибири: XXIII Рабочая группа: тез. докл. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2016. С. 110.
 14. Vorontsov M.A., Kolosov V.V. Target-in-the-loop beam control: Basic considerations for analysis and wave-front sensing // J. Opt. Soc. Am. A. 2005. V. 22. P. 126–141.
 15. Lachinova S.L., Vorontsov M.A., Dudorov V.V., Kolosov V.V., Valley M.T. Anisoplanatic imaging through atmospheric turbulence: Brightness function approach // Proc. SPIE. 2007. V. 6708. P. 67080E.
 16. Дудоров В.В., Колосов В.В. Коррекция некогерентных изображений объектов в условиях анизопланатизма турбулентности по опорному источнику излучения различной длины волны // Оптика атмосф. и океана. 2010. Т. 23, № 5. С. 392–397; Dudorov V.V., Kolosov V.V. Anisoplanatic Turbulence correction in incoherent imaging by using reference sources with different wavelengths // Atmos. Ocean. Opt. 2010. V. 23, N 5. P. 353–358.
 17. Dudorov V.V., Eremina A.S. Determination of atmospheric turbulent inhomogeneity wind drift from sequence of incoherent images // Proc. SPIE. 2014. V. 9292. P. 92921F.
 18. Еремина А.С., Дудоров В.В. Способ фильтрации и определения скорости смещения турбулентных искажений в видеоряде оптических изображений при ветровом сносе атмосферных неоднородностей // Изв. вузов. Физика. 2015. Т. 58, № 8/2. С. 192–194.
 19. Dudorov V.V., Eremina A.S. Filtration of optical image distortions for retrieving the drift velocity of atmospheric turbulence inhomogeneities // Proc. SPIE. 2015. V. 9680. P. 96802E.
 20. Дудоров В.В., Еремина А.С. Определение поперечной составляющей скорости ветра на основе анализа видеоряда изображений удаленных объектов. Часть 1. Смещение тонкого слоя турбулентных неоднородно-

стей // Оптика атмосф. и океана. 2017. Т. 30, № 4. С. 274–280; *Dudorov V.V., Eremina A.S.* Retrieval of crosswind velocity based on the analysis of remote object images: Part 1 – Drift of a thin layer of turbulent

inhomogeneities // Atmos. Ocean. Opt. 2017. V. 30, N 5. P. 422–428.
21. *Стьюард И.Г.* Введение в Фурье-оптику. М.: Мир, 1985. 182 с.

V.V. Dudorov, A.S. Eremina. **Digital compensation of turbulent distortions of incoherent optical images using multiaperture systems.**

Possibilities of enhancement of the operational efficiency of optical multiaperture systems in a turbulent atmosphere are studied in numerical simulation. Features of the synthesis of an object image as a sum (superposition) of images from every individual aperture are analyzed under the presence of turbulent distortions. The quality of images synthesized by a matrix of $N \times N$ subapertures ($N = 5-10$) is analyzed. It is shown that turbulent distortions in an image synthesized with the use of many subapertures accounting shifts of subimages at each subaperture are isoplanar in a wide range of atmospheric conditions. This allows significant improvement of the image quality by means of computer correction. In this case, there is an optimal subaperture size mainly determined by the Fried parameter, which characterizes the degree of turbulent distortions.