

Компьютерная коррекция турбулентных искажений на основе использования мультиапертурных систем наблюдения

В.В. Дудоров¹, А.С. Еремина¹

¹Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения РАН, пл. академика Зуева 1, Томск, Россия, 634055

Аннотация. На основе численного моделирования исследуются возможности использования многоапертурных систем наблюдения для постдетекторной коррекции изображений. Сформированное синтезированное изображение получается суммированием субизображений, число которых равно числу приемных субапертур. Определены оптимальные характеристики многоапертурных систем в зависимости от силы турбулентности на трассе наблюдения и размера наблюдаемого объекта.

1. Введение

Проблемой постдетекторной (компьютерной) коррекции изображений, полученных через турбулентную атмосферу, занимаются давно. В задачах наблюдения объектов на горизонтальных трассах, отличительной особенностью является наличие анизопланатизма (неоднородности искажений на площади объекта), который обусловлен наличием объемной турбулентной среды на трассе наблюдения и широким полем зрения приемника.

Для осуществления компьютерной коррекции полученное изображение должно быть изопланарным. В данной работе используется подход, основанный на разделении приемной апертуры [1], который позволяет формировать изображения, допускающие корректное решение обратной задачи восстановления объекта, за существенно меньшее время, чем в случае накопления изображений во времени [2]. Синтезированное многоапертурной системой наблюдения изображение получается суммированием субизображений, число которых равно числу приемных субапертур. При большом количестве субапертур и дополнительной компенсации смещения субизображений усреднение турбулентных искажений при суммировании субизображений позволяет сформировать практически изопланарно искаженное изображение [3,4].

2. Сравнение результатов работы метода с показаниями анемометров

Исследование выполнено на основе численного моделирования изображений периодического гармонического объекта. Операция восстановления объекта из его изображения представляет из себя традиционную операцию обратной свертки с подбором функции размытия точки (ФРТ) [3,4]. При наблюдении в условиях сильного анизопланатизма турбулентных искажений для оценки эффективности восстановления структуры объекта использовалась следующую частотно-контрастная характеристика (ЧКХ):

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

где $\overline{I_{obj}^{rec}(\mathbf{r}_i, \nu)} = \frac{1}{N_{pix}} \sum_{i=1}^{N_{pix}} I_{obj}^{rec}(\mathbf{r}_i, \nu)$ - средняя яркость изображения, N_{pix} - число пикселей в анализируемом изображении, ν - пространственная частота, $I_{obj}^{rec}(\mathbf{r}, \nu)$ - восстановленное изображение объекта, \mathbf{r} - радиус-вектор координат, N_{pix} - число пикселей в анализируемом изображении.

На рисунках 1 представлена характерная зависимость ЧКХ изображения восстановленного периодического гармонического объекта из изображения, сформированного многоапертурной системой, от размера субапертуры a_{sub} . При этом поскольку общее количество субапертур фиксировано, то изменение a_{sub} приводит к изменению общего размера синтезированной апертуры.

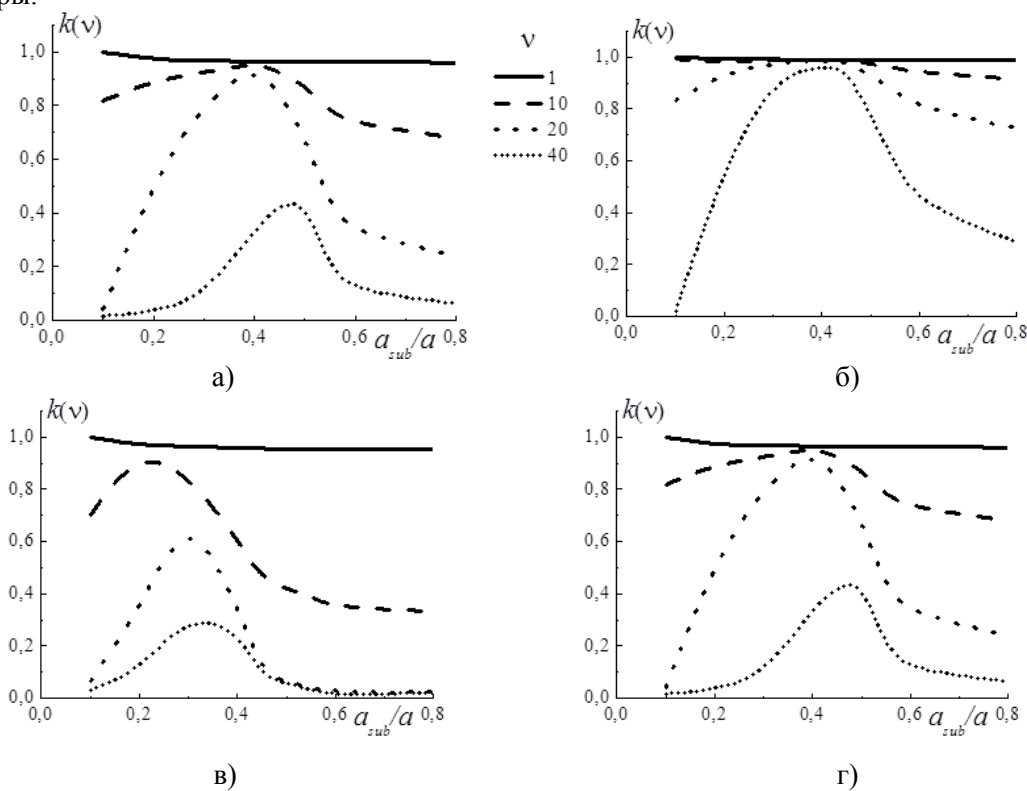


Рисунок 1. Зависимость $k(\nu)$ от размера субапертуры a_{sub} , нормированного на параметр a , определяющий дистанцию наблюдения z и турбулентные условия $2a/r_0$, $N_{sub}=64$. (а) $z=0.05ka^2$ и $2a/r_0=4$; (б) $z=0.05ka^2$ и $2a/r_0=2.2$; (в) $z=0.1ka^2$ и $2a/r_0=4$; (г) $z=0.1ka^2$ и $2a/r_0=2.2$. В данном случае ν (пространственная частота) принимает значения 1 (сплошная линия), 10 (пунктирная), 20 (точечная), 40 (линия с мелкой точкой).

Видно, что при изменении условий наблюдения (дистанции и силы турбулентности) положение максимума ЧКХ восстановленного изображения изменяется. Увеличение дистанции требует увеличения размера субапертуры, а усиление турбулентности – наоборот его уменьшения. Соответственно для определенных условий наблюдения существует свое оптимальное значение размера субапертуры, позволяющее наилучшим образом восстановить искаженное изображение. При этом можно отметить, что в связи с некорректностью решения обратной задачи восстановления искаженных изображений в условиях анизопланатизма повышение ЧКХ не говорит однозначно об улучшении качества изображения. В связи с этим также анализировались зависимости коэффициент взаимной корреляции R восстановленного и

неискаженного изображений анализируемого гармонического периодического объекта. Соответствующие рисунку 1 зависимости R представлены на рисунке 2 для разного значения частоты ν . Данные результаты также подтверждают, что правильный выбор размера субапертуры в зависимости от атмосферных условий наблюдения является принципиальным.

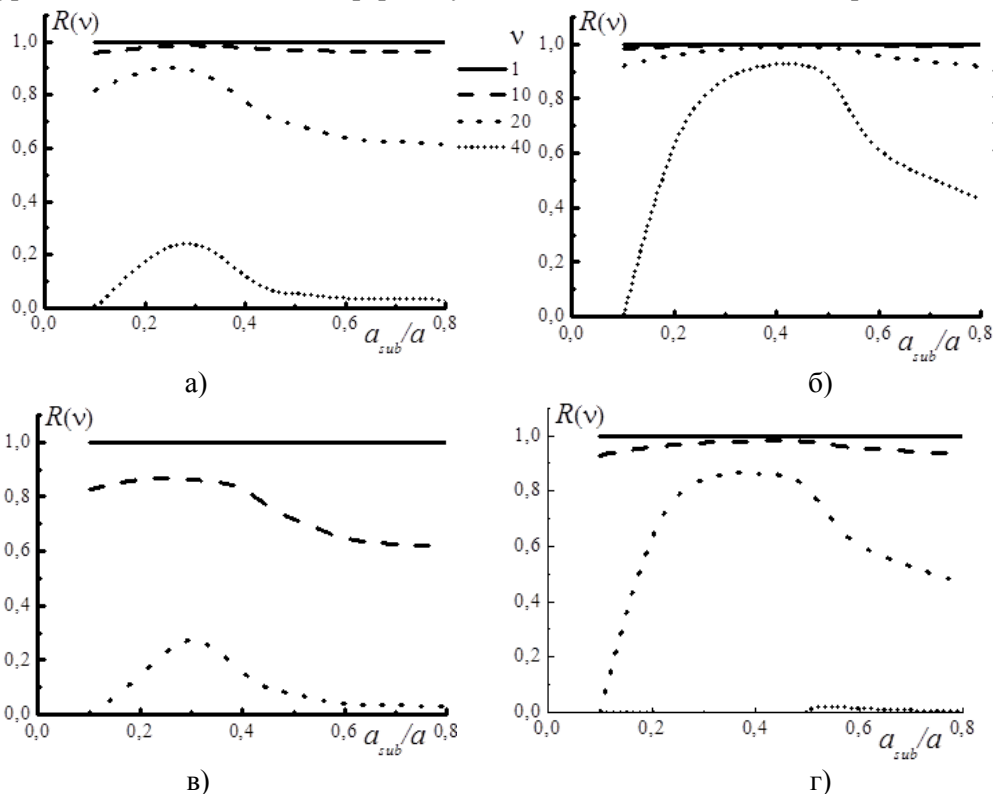


Рисунок 2. Зависимость $R(\nu)$ от размера субапертуры a_{sub} , нормированного на параметр a , определяющий дистанцию наблюдения z и турбулентные условия $2a/r_0$, $N_{sub}=64$. (а) $z=0.05ka^2$ и $2a/r_0=4$; (б) $z=0.05ka^2$ и $2a/r_0=2.2$; (в) $z=0.1ka^2$ и $2a/r_0=4$; (г) $z=0.1ka^2$ и $2a/r_0=2.2$.

Было получено, что для повышения эффективности компенсации турбулентных искажений необходимо уменьшать размер приемных субапертур. Объяснить это можно тем, что коррекция смещений субизображений является аналогом коррекции наклонов волнового фронта на сетке субапертур (условно составном адаптивном зеркале). Соответственно уменьшение размера субапертур приведет к повышению разрешения (уменьшению элементов) условно адаптивной сетки, на которой эта коррекция выполняется. С другой стороны, для снижения дифракционных искажений размер субапертур должен быть максимально большим. В связи с этим существует некоторое оптимальное значение размера приемных субапертур, обеспечивающее наилучшее восстановление изображения объекта.

Для достаточно короткой дистанции и слабых турбулентных искажений хорошее восстановление изображения происходит в широком диапазоне значений размера субапертур. При увеличении дистанции очевидно, что для малых субапертур дифракционные искажения не позволяют хорошо восстанавливать изображения. А при увеличении степени турбулентных искажений необходимо уменьшать размер субапертур, в пределах которых компенсируются локальные наклоны волнового фронта. При этом оптимальное значение размера субапертуры определяется величиной радиуса Фрида.

3. Заключение

Таким образом, можно сказать, что оптимальное значение субапертуры, обеспечивающее наилучшую коррекцию синтезированных многоапертурных изображений, определяется степенью турбулентных искажений и дифракционными параметрами приемной системы. В

случае, когда дифракционные искажения являются несущественными по сравнению с турбулентными, оптимальное значение радиуса субапертуры составляет порядка половины радиуса Фрида, определяющего степень турбулентных искажений.

4. Литература

- [1] Ivanov, M. Image Reconstruction by Aperture Diversity Blind Deconvolution / M. Ivanov, D. McGaughey // Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference / Maui: The Maui Economic Development Board, 2007. – 78 p.
- [2] Hope, D.A. High-resolution speckle imaging through strong atmospheric turbulence / D.A. Hope, S.M. Jefferies, M. Hart, J.G. Nagy // Opt. Express. – 2016. – Vol. 24(11). – P. 12116-12129.
- [3] Дудоров, В.В. Постдетекторная коррекция изображений в турбулентной атмосфере при использовании многоапертурных систем наблюдения / В.В. Дудоров, А.С. Еремина // Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы: материалы XXII Международного симпозиума, Иркутск, 3-7 июля 2017 г. – Томск: Издательство ИОА СО РАН, 2017. – С. В159-В163.
- [4] Дудоров, В.В. Компьютерная коррекция турбулентных искажений некогерентных оптических изображений при использовании многоапертурных систем наблюдения / В.В. Дудоров, А.С. Еремина // Оптика атмосферы и океана. – 2018. – Т. 31, № 02. – С. 95-102.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 18-79-00179).

Computer correction of turbulent distortions using multi-aperture systems

V.V. Dudorov¹, A.S. Eremina¹

¹V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS (IAO SB RAS), Academician Zuev square 1, Tomsk, Russia, 634055

Abstract. Possibilities of optical multiaperture systems for post-detection image correction are studied in numerical simulation. Formed synthesized image is obtained by summing up subimages, the number of which is equal to the number of receiving subapertures. The optimal characteristics of multiaperture systems depending on the turbulence force on the observation path and the size of the observed object are determined.