

П.А. Бакут, В.В. Миловзоров, А.А. Пахомов, А.Д. Ряхин

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ ПО НЕПОЛНОЙ ИНФОРМАЦИИ О ПРОСТРАНСТВЕННОМ СПЕКТРЕ В МНОГОАПЕРТУРНОЙ СИСТЕМЕ

В сообщении рассматривается задача восстановления изображения объекта в линейной многоапертурной оптической системе (МОС). Информация о спектре объекта известна не полностью, что обусловлено видом области пространственных частот, синтезируемой данной МОС, и условиями регистрации. Получены выражения для числа независимых отсчетов спектра объекта (его модуля, фазы), которое обеспечивает удовлетворительное качество восстановления изображения при различных отношениях сигнал — шум в исходных данных.

Обычно задача обработки серии короткоэкспозиционных изображений астрономического объекта заключается в компенсации искажений изображений, обусловленных влиянием турбулентной атмосферы и шумами регистрации [1]. При этом обработка сводится к получению по зарегистрированной серии искаженных изображений оценок модуля и фазы Фурье-спектра и восстановления по ним его неискаженного изображения [2]. Хотя потенциальные точности этих оценок сравнимы по величине, на практике из-за различных отклонений от оптимальных условий формирования и регистрации исходных изображений нередко одна компонента спектра оказывается значительно точнее другой, и в этом случае изображение восстанавливают только по одной компоненте [3, 4].

В последние годы активно разрабатываются многоапертурные оптические системы (МОС), предназначенные для пространственного синтеза апертур с эквивалентным диаметром более 10 м [5, 6]. Из-за конечного числа и ограниченного размера составляющих МОС телескопов информацию о Фурье-спектре объекта можно получить лишь на отдельных участках синтезируемой области частот [7, 8]. В этой ситуации задача обработки существенно усложняется: для восстановления изображения необходимо расширение полученных оценок спектра на всю область пространственных частот. В данном сообщении в качестве первого этапа решения этой задачи представлены результаты моделирования процесса восстановления в случае, когда информация о спектре (или только о компонентах спектра) известна в «кресте» (рис. 1, *a*), ширина сторон которого D/λ (λ — длина волны) существенно меньше их длины L/λ . Данная ситуация может возникнуть, например, при использовании линейной МОС, состоящей из телескопов диаметром D при максимальном расстоянии разнеса L , которая используется при регистрации исходных для обработки изображений в двух взаимно перпендикулярных положениях.

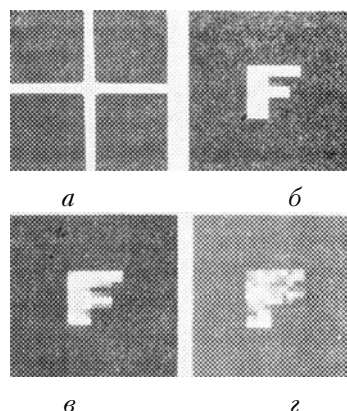


Рис. 1. *a* — область пространственных частот, в которой задана информация о спектре или его компоненте; *b* — изображение, восстановленное по спектру, заданному в области «креста»; *v* — изображение, восстановленное только по фазе спектра, заданной в области «креста»; *z* — начальная оценка изображения, восстановленная по модулю спектра, экстраполированному из области «креста» на всю частотную плоскость

Можно показать, что заданная информация о спектре определяет размеры квадратной матрицы с изображением, содержащей максимальное число независимых действительных отсчетов M_0 (т. е. число элементов разрешения размера λ/L). Один из вопросов исследования заключался в оценивании минимального числа равномерных независимых в пределах «креста» отсчетов спектра M_c , его модуля M_m и фазы M_f , достаточного для устойчивого восстановления изображения. При моделировании был использован известный итерационный подход, хорошо зарекомендовавший себя при решении амплитудной и фазовой проблем [3, 4]. В данном случае итерационная схема имеет вид

$$I_{k+1} = \hat{P}_2 \hat{F}^{-1} \hat{P}_1 \hat{F} I_k, \quad (1)$$

где I_k — оценка изображения на k -й итерации; \hat{F} и \hat{F}^{-1} — операторы прямого и обратного преобразования Фурье; \hat{P}_1 — оператор замены в «кресте» значений спектра (или его компонент) на заданные; \hat{P}_2 — оператор, который приравнивает нулю значения оценки изображения в точках вне квадратной матрицы, а также в точках, где нарушается условие положительности. При моделировании в качестве заданного объекта была выбрана латинская буква «F», вписанная в квадратную рамку 10×10 , помещенную в центре поля размерами 32×32 ($L/\lambda = 32$). Величина D/λ менялась от 1 до 11.

На рис. 1, б, в показаны характерные изображения, полученные при восстановлении. В результате проведенных исследований было установлено следующее.

1. Удовлетворительное качество восстановления (ошибка менее 1%) и скорость сходимости (не более 100 итераций) достигаются при отношениях $M_c/M_0 \approx M_\phi/M_0 \geq 1,5$,

$$M_M/M_0 \geq 3.$$

2. При добавлении к заданной информации белого гауссова шума процесс восстановления по спектру и фазе оказывается устойчивым при отношениях сигнал-шум (ОСШ), равных 10 и выше, по модулю — при ОСШ ≥ 30 .

3. Процесс восстановления по спектру или его фазе в «кресте» слабо зависит от начальной оценки, в качестве которой выбирались: а) случайное поле с равномерным распределением значений от 0 до 1; б) изображение, соответствующее Фурье-спектру, заданному в «кресте» и равному нулю вне его с наложенным шумом (ОСШ менялось в пределах 1÷100). Выяснилось, что сходимость алгоритма восстановления по модулю при начальной оценке (п. а) неудовлетворительна, если в данных присутствует шум.

Как показали дополнительные исследования, сходимость алгоритма восстановления по модулю можно заметно повысить, если в качестве начальной оценки выбирать результат восстановления изображения по полному, хотя и зашумленному Фурье-модулю [3, 9]. Для экстраполяции значений модуля из «креста» на всю Фурье-область целесообразно использовать итерационный алгоритм, схема которого аналогично (1) записывается в виде

$$A_{k+1} = \hat{P}_4 \hat{F}^{-1} \hat{P}_3 \hat{F} A_k. \quad (2)$$

Здесь A_k — оценка автокорреляции изображения, \hat{P}_3 — оператор замены квадрата модуля в «кресте» на заданный, \hat{P}_4 — оператор «обнуления» вне квадратной рамки автокорреляции (она определяется как удвоенная рамка изображения). Исследование данного алгоритма показало: 1) ошибка экстраполяции незашумленного модуля после 30÷50 итераций составляет 1÷2%; 2) устойчивая экстраполяция возможна при $M_M/M_0 \geq 3$ и ОСШ ≥ 30 . При нарушении этих условий алгоритм работает, но появляются сильные искажения модуля в высокочастотной области, что ведет к увеличению ошибки последующего восстановления изображения. Начальной оценкой для итерационной процедуры экстраполяции служила автокорреляция, полученная при обратном преобразовании Фурье квадрата модуля спектра с ОСШ ≥ 30 , заданного в «кресте» и равного нулю вне его. Начальная оценка, восстановленная по полученному с помощью экстраполяции модулю, представлена на рис. 1, з.

1. Бакут П.А., Польских С.Д., Ряхин А.Д., Свиридов К.Н., Устинов Н.Д. // Проблемы передачи информации. 1985. Т. 21. № 2. С. 32.
2. Бакут П.А., Ряхин А.Д., Свиридов К.Н. // Радиотехника и электроника. 1988. Т. 33. № 7. С. 1446.
3. Бакут П.А., Ряхин А.Д., Свиридов К.Н., Устинов Н.Д. // Оптика и спектроскопия. 1985. Т. 58. № 4. С. 905.
4. Бакут П.А., Пахомов А.А., Ряхин А.Д., Свиридов К.Н., Устинов Н.Д. // Оптика и спектроскопия. 1988. Т. 64. № 1. С. 165.
5. Proc. SPIE. 1986. V. 628. 561 p.
6. Proc. SPIE. 1986. V. 643. 245 p.
7. Бакут П.А., Плотников И.П., Ряхин А.Д., Свиридов К.Н. // Оптика атмосферы. 1988. Т. 1. № 6. С. 116.
8. Бакут П.А., Плотников И.П., Рожков И.А., Ряхин А.Д., Свиридов К.Н. // Оптика атмосферы. 1988. Т. 1. № 11. С. 55.
9. Fienup J.R., Feldkamp G.V. // Proc. SPIE. 1980. V. 234. P. 95.

Поступило в редакцию
10 апреля 1989 г.

P.A. Bakut, V.V. Milovzorov, A.A. Pakhomov, A.D. Ryakhin. **Image Restoration Based on the Use of Incomplete Information on the Spatial Spectrum in a Multiaperture System.**

Image restoration problem in a linear multiaperture optical system (MOS) is considered. Object spectrum is known incompletely because of the MOS configuration and detection conditions. The relationships for the number of independent samples of the object spectrum (spectrum modulus and phase) have been obtained, which yield satisfactory quality of the restoration at different signal-to-noise ratios in the initial data.