

Исследование влияния aberrаций фурье-преобразующей системы на восстановленное изображение символа в системах сокрытия информации

© Л.Н. Тимашова, Н.Е. Трофимов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Для оптико-электронных систем сокрытия информации проведен теоретический анализ процесса формирования пространственно-частотного спектра символа, встроенного скрытым образом в изображение окружающих объектов. Исследовано влияние различных aberrаций третьего порядка на частотный спектр. Показано, что aberrации вносят искажения в виде сдвига спектра и изменения его масштаба. Исследованы восстановленное изображение символа в виде ограниченной гармонической решетки и зависимость его качества от искажений частотного спектра. Обоснованы рекомендации к синтезу фурье-преобразующих объективов.

Ключевые слова: сокрытие данных, стеганография, aberrации оптической системы, фурье-преобразующий объектив.

Введение. Задачи, связанные с сокрытием информации, всегда были актуальными. Для их решения используют как аппаратные, так и программные методы. Встраивание скрытой информации в изображение или видеозапись, как правило, осуществляют либо программно, либо аппаратно в электронном тракте устройства регистрации. Альтернативой этим методам является встраивание скрытых данных в оптический канал параллельно с записью основного изображения. [1]. Системы, построенные на этом принципе, обладают рядом достоинств, которые облегчают криминалистический анализ защищенных видеозаписей или повышают степень защиты стеганографических систем. В настоящее время активно ведется разработка оптических методов, позволяющих скрыто встраивать данные в произвольное изображение или видеозапись.

На рис. 1 представлена функциональная схема устройства, формирующего в плоскости регистрации изображение пространства объектов с наложенным на него распределением освещенности (стеганограммой), в котором содержится скрываемое сообщение [2]. Схема содержит два канала: изображающий, формирующий изображение пространства объектов на матричном приемнике излучения (МПИ), и фурье-преобразующий, формирующий накладываемую на изображение стеганограмму.

частотой ν_{\max} АФТ: $2W_{\text{ФПО}} = 2\lambda\nu_{\max}$. Линейное поле ФПО (в плоскости МПИ) определяется как $2x'_{\text{ФПО}} = 2\lambda\nu_{\max} f'_{\text{ФПО}}$.

Аберрационная функция зрачка ФПО

$$P_{\text{ФПО}}(\xi, \eta; x', y') = \exp[jk\Delta l_{\text{ФПО}}(\xi, \eta; x', y')],$$

где $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число;

$$\begin{aligned} \Delta l_{\text{ФПО}}(\xi, \eta; x', y') = & \Delta l_{\text{деф}}(\xi, \eta) + \Delta l_{\text{сф}}(\xi, \eta) + \Delta l_{\text{ком}}(\xi, \eta; x', y') + \\ & + \Delta l_{\text{кр}}(\xi, \eta; x', y') + \Delta l_{\text{аст}}(\xi, \eta; x', y') + \Delta l_{\text{дис}}(\xi, \eta; x', y') \end{aligned}$$

суммарная волновая aberrация, включающая элементарные aberrации — дефокусировку, сферическую aberrацию, кому, кривизну поля, астигматизм и дисторсию соответственно.

Пусть амплитуда падающей на транспарант плоской волны $A_0 = 1$. С учетом aberrационной функции зрачка ФПО распределение поля непосредственно за АФТ имеет вид

$$\begin{aligned} A(\xi, \eta; x', y') = & t_{\text{АФТ}}(\xi, \eta) P_{\text{ФПО}}(\xi, \eta; x', y') = \\ = & [1 - t_c(\xi, \eta)] t_{\text{ф}}(\xi, \eta) P_{\text{ФПО}}(\xi, \eta; x', y'). \end{aligned}$$

Распределение комплексной амплитуды поля в плоскости МПИ с точностью до нормирующего множителя определяется как фурье-спектр комплексной амплитуды поля на выходе амплитудно-фазового транспаранта:

$$\begin{aligned} \mathcal{F}\{A(\xi, \eta; x', y')\} = & \mathcal{F}\{t_a(\xi, \eta)\} \otimes \mathcal{F}\{P_{\text{ФПО}}(\xi, \eta; x', y')\} = \\ = & \tilde{t}_{\text{АФТ}}(x', y') \otimes h(x', y'), \end{aligned}$$

где $h(x', y') = \mathcal{F}\{P_{\text{ФПО}}(\xi, \eta; x', y')\}$ — функция рассеяния ФПО.

Распределение освещенности в плоскости МПИ определяется как сумма распределения освещенности, сформированного изображающим каналом системы регистрации $E_I(x', y')$, и распределения освещенности стеганограммы $E_s(x', y')$, сформированной фурье-преобразующим каналом:

$$E_{\Sigma}(x', y') = E_I(x', y') + E_s(x', y').$$

Из зарегистрированного распределения освещенности $E_{\Sigma}(x', y')$ с использованием цифровой фильтрации можно получить оценку распределения освещенности в стеганограмме $\hat{E}_s(x', y')$ [3]. Поскольку данная работа посвящена анализу искажений, внесенных ФПО, при дальнейшем анализе принимаем $\hat{E}_s(x', y') = E_s(x', y')$, т. е.

искажения, вносимые в скрываемое сообщение изображающим каналом, при моделировании не учитываются.

На данном этапе проведен анализ влияния аберраций на вид восстановленного символа при значении фазового коэффициента пропускания АФТ $t_{\phi}(\xi, \eta) = 1$. В этом случае $t_{\text{АФТ}}(\xi, \eta) = t_a(\xi, \eta) = [1 - t_c(\xi, \eta)]$. Распределение освещенности в плоскости регистрации фурье-преобразующего канала

$$\begin{aligned} E_s(x', y') &= \left| \tilde{t}_a(x', y') \otimes h(x', y') \right|^2 = \left| \left[\delta(x', y') - \tilde{t}_c(x', y') \right] \otimes h(x', y') \right|^2 = \\ &= \left| h(x', y') - \tilde{t}_c(x', y') \otimes h(x', y') \right|^2 = \\ &= \left[h(x', y') - \tilde{t}_c(x', y') \otimes h(x', y') \right] \left[h(x', y') - \tilde{t}_c(x', y') \otimes h(x', y') \right]^* = \\ &= \left| h(x', y') \right|^2 + \left| \tilde{t}_c(x', y') \otimes h(x', y') \right|^2 - \left[\tilde{t}_c(x', y') \otimes h(x', y') \right] h^*(x', y') - \\ &\quad - \left[\tilde{t}_c(x', y') \otimes h(x', y') \right]^* h(x', y'), \end{aligned}$$

где «*» обозначает комплексно-сопряженную функцию.

Анализ влияния аберраций фурье-преобразующего канала необходим для выработки требований на аберрационную коррекцию при синтезе ФПО. В качестве тестового сигнала для исследования влияния аберраций использована ограниченная гармоническая решетка:

$$t_c(\xi, \eta) = \frac{1}{2} \left[1 - \cos(2\pi\nu_p \xi) \right] \text{rect} \left(\frac{\xi}{a_p}, \frac{\eta}{b_p} \right),$$

где a_p, b_p — размеры решетки.

Влияние аберраций ФПО на вид восстановленного символа рассматривается при применении алгоритма восстановления, использующего потерянную при регистрации фазу [4]. В этом случае оценка распределения комплексной амплитуды поля после транспаранта имеет вид

$$\hat{A}(\xi, \eta) = \mathcal{F}^{-1} \left\{ \sqrt{E_s(x', y')} \exp \left[i\psi_s(x', y') \right] \right\},$$

где $\psi_s(x', y') = \arg(A(x', y'))$ — потерянная при регистрации квадратичным приемником фазовая составляющая комплексной амплитуды поля в плоскости регистрации. Данный алгоритм удобен с точки зрения оценки влияния аберраций, поскольку потеря информации связана исключительно с наличием неучтенных фазовых искажений, вносимых фурье-преобразующим объективом.

Анализ влияния aberrаций на восстановленное изображение проведен для символов на краю транспаранта. Такое их положение соответствует краю зрачка ФПО, где волновые aberrации принимают наибольшие значения.

Все расчеты выполнены численными методами для aberrаций третьего порядка в среде MATLAB, так как аналитические выражения, удобные для проведения анализа, могут быть получены только при допущениях, ограничивающих общность результатов.

Моделирование проведено для символа в виде одномерной смещенной гармонической решетки, задаваемой выражением

$$t_c(\xi, \eta) = \frac{1}{2} [1 - \cos(2\pi\nu_p \xi)] \text{rect}\left(\frac{\xi - d}{a_p}\right).$$

При моделировании использовались следующие значения параметров:

- пространственная частота решетки $\nu_p = 100 \text{ мм}^{-1}$;
- ширина решетки $a_p = 0,1 \text{ мм}$;
- смещение решетки относительно центра кадровой рамки $d = 1 \text{ мм}$;
- размер зрачка ФПО $D_{\text{ФПО}} = 2,56 \text{ мм}$;
- размер МПИ $2x'_{\text{МПИ}} = 6,4 \text{ мм}$;
- фокусное расстояние ФПО $f' = 24 \text{ мм}$;
- длина волны излучения источника $\lambda = 0,8 \text{ мкм}$.

Все aberrации заданы для края зрачка (+1,28 мм); полевые aberrации — для края зрачка и края поля (+3,2 мм в плоскости МПИ, что при заданных условиях соответствует пространственной частоте $166,67 \text{ мм}^{-1}$). На рис. 2–11 приведены частотные спектры и восстановленные изображения символов, полученные для различных видов и значений aberrаций.

Распределение амплитудного коэффициента пропускания транспаранта с гармонической решеткой приведено на рис. 2, а его увеличенный фрагмент, содержащий решетку, — на рис. 3.

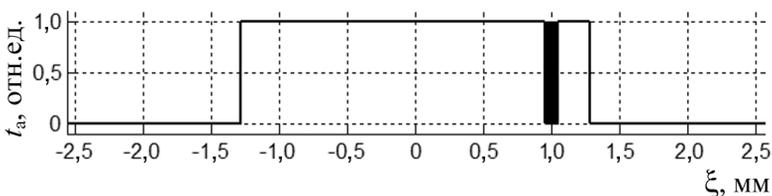


Рис. 2. Амплитудный коэффициент пропускания транспаранта с символом в виде ограниченной гармонической решетки

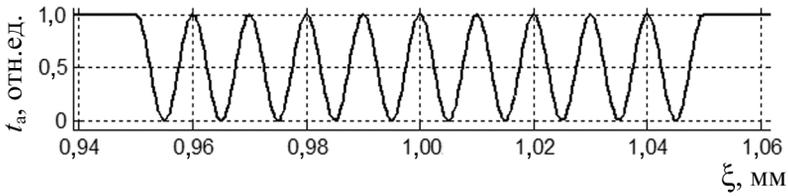


Рис. 3. Увеличенный фрагмент транспаранта, содержащий решетку

Идеальный пространственно-частотный спектр символа $|A_S|$, сформированный безабберационным ФПО, приведен на рис. 4, на рис. 5 представлено восстановленное изображение решетки. Видно, что сформированный идеальным ФПО фурье-спектр решетки симметричен относительно оптической оси. Изображение решетки в этом случае восстанавливается практически без искажений.

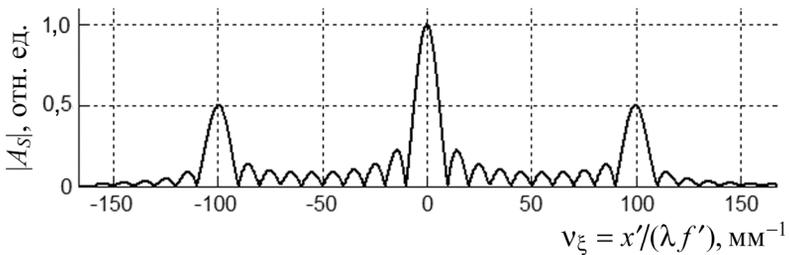


Рис. 4. Фурье-спектр ограниченной гармонической решетки без искажений

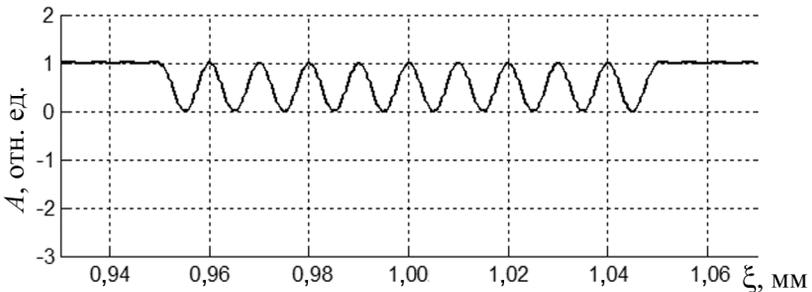


Рис. 5. Восстановленное идеальное изображение решетки

На основе принятого модельного описания проведен анализ и рассчитаны фурье-спектры и восстановленные изображения решетки при наличии у ФПО aberrаций третьего порядка.

Дефокусировка. ФПО вызывает нарушение симметрии фурье-спектра решетки, в основном проявляющееся в его сдвиге относительно оптической оси (рис. 6, а). Это приводит к тому, что в восстановленном символе появляется низкочастотная составляющая, соответствующая смещенному центральному максимуму пространственно-частотного спектра, что вызывает падение контраста в от-

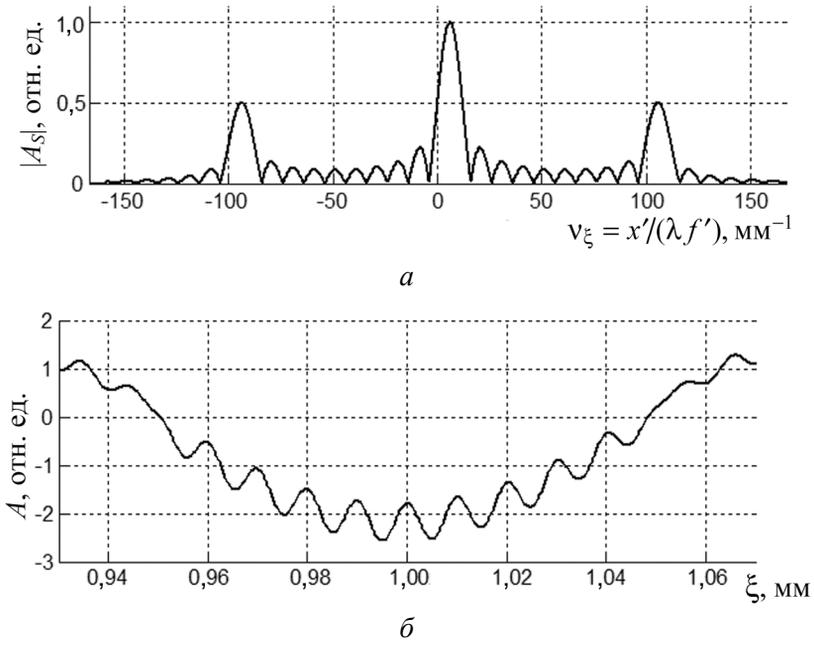


Рис. 6. Фурье-спектр (*a*) и восстановленное изображение (*б*) ограниченной решетки при дефокусировке ФПО $\Delta l_{\text{деф}} = 5\lambda$

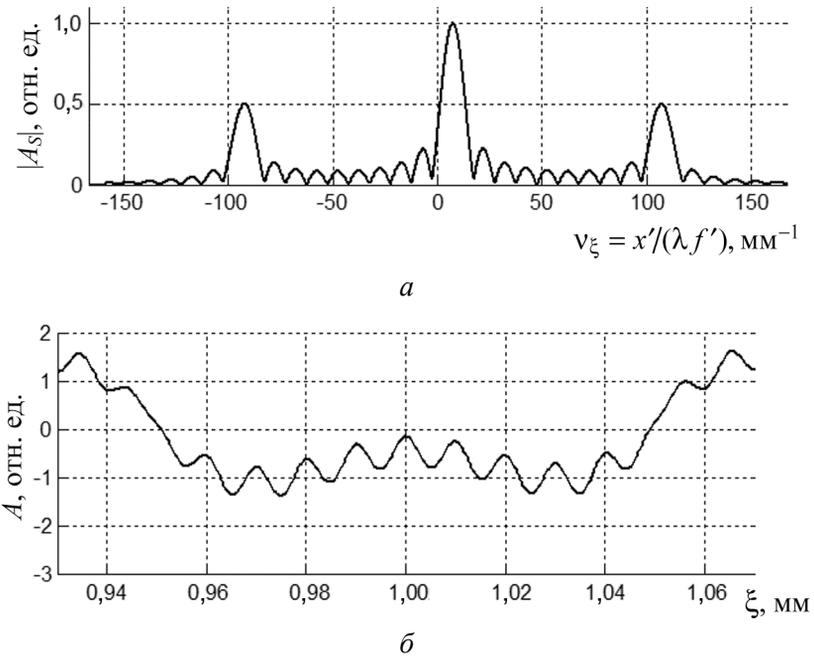


Рис. 7. Фурье-спектр (*a*) и восстановленное изображение (*б*) ограниченной решетки при сферической aberrации ФПО $\Delta l_{\text{сф}} = 5\lambda$

дельных областях изображения решетки (рис. 6, б). Возникающие при восстановлении искажения могут привести к «размытию» границ символов.

Сферическая aberrация влияет на ПЧС решетки и вид восстановленного символа аналогично дефокусировке, но ее влияние более сильно выражено (рис. 7).

Кома у ФПО приводит к изменению масштаба фурье-спектра решетки при сохранении симметрии (рис. 8). При $\Delta l_{\text{ком}} = 5\lambda$ снижение контраста в изображении решетки практически не наблюдается, но имеет место искажение пространственной частоты решетки. Однако при большем значении комы $\Delta l_{\text{ком}} = 30\lambda$ (рис. 9) в центре изображения контраст резко падает, а границы символа сильно «размываются».

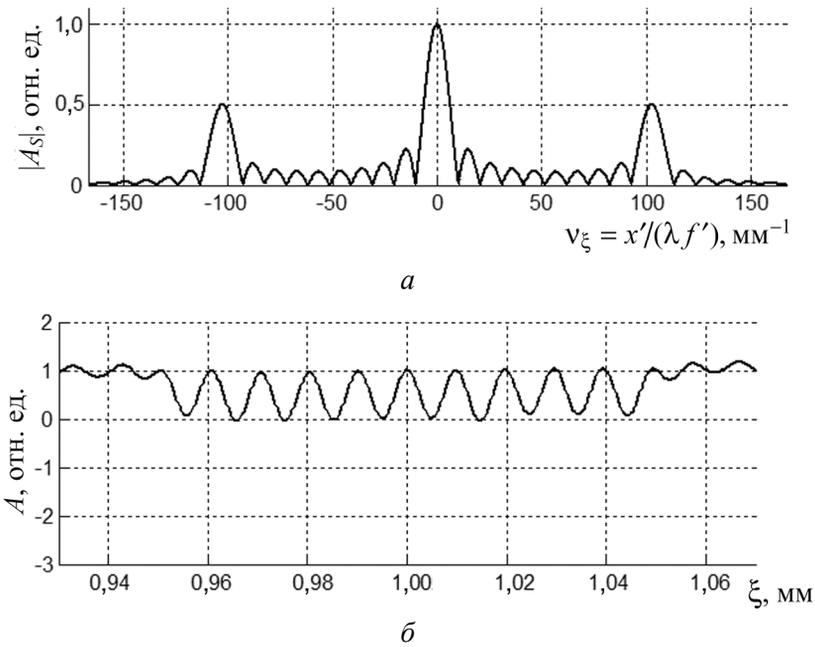


Рис. 8. Фурье-спектр (а) и восстановленное изображение (б) ограниченной решетки при коме ФПО $\Delta l_{\text{ком}} = 5\lambda$

Кривизна поля ФПО проявляется в асимметрии фурье-спектра решетки (рис. 10). Однако даже при значениях $\Delta l_{\text{кр}} = 10\lambda$ эти искажения незначительны, и они практически не влияют на контраст изображения решетки.

Дисторсия проявляется следующим образом. При $\Delta l_{\text{дис}} = 10\lambda$ фурье-спектр символа остается симметричным относительно оптической оси, однако его масштаб изменяется нелинейно в координатах частотного спектра, что приводит к изменению пространственной частоты восстановленной решетки (рис. 11). Контраст изображения символа падает незначительно, к краям изображения несколько сильнее.

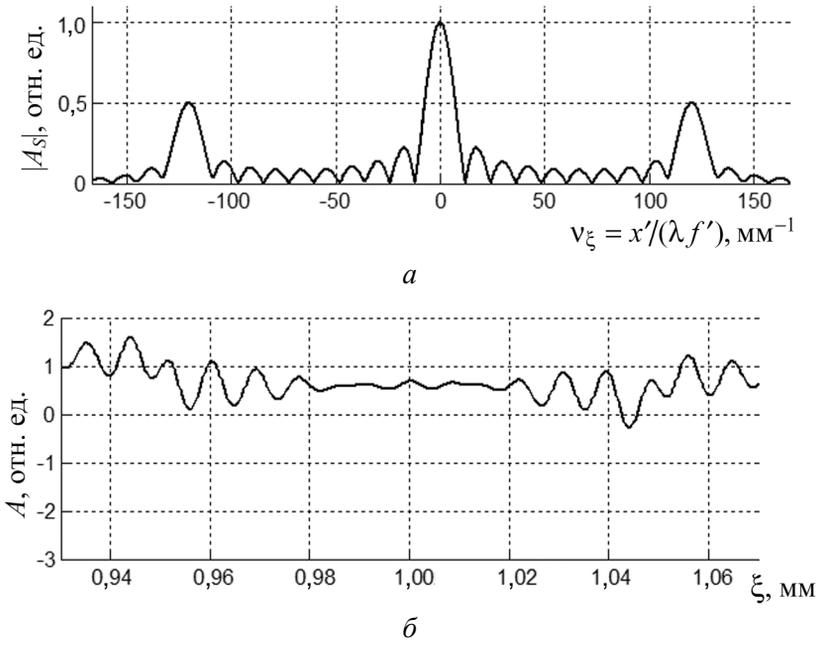


Рис. 9. Фурье-спектр (а) и восстановленное изображение (б) ограниченной решетки при коме ФПО $\Delta l_{\text{ком}} = 30\lambda$

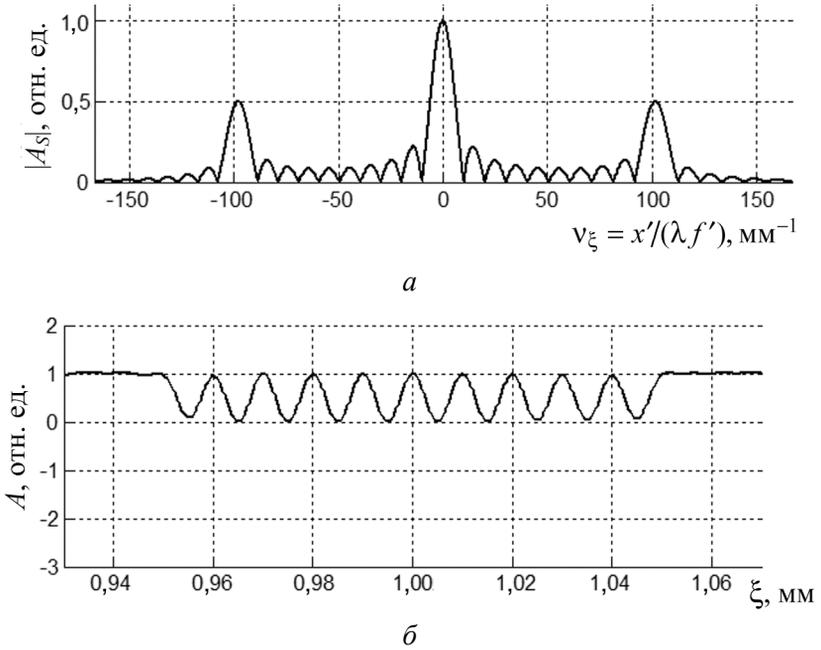


Рис. 10. Фурье-спектр (а) и восстановленное изображение (б) ограниченной решетки при кривизне поля ФПО $\Delta l_{\text{кр}} = 10\lambda$

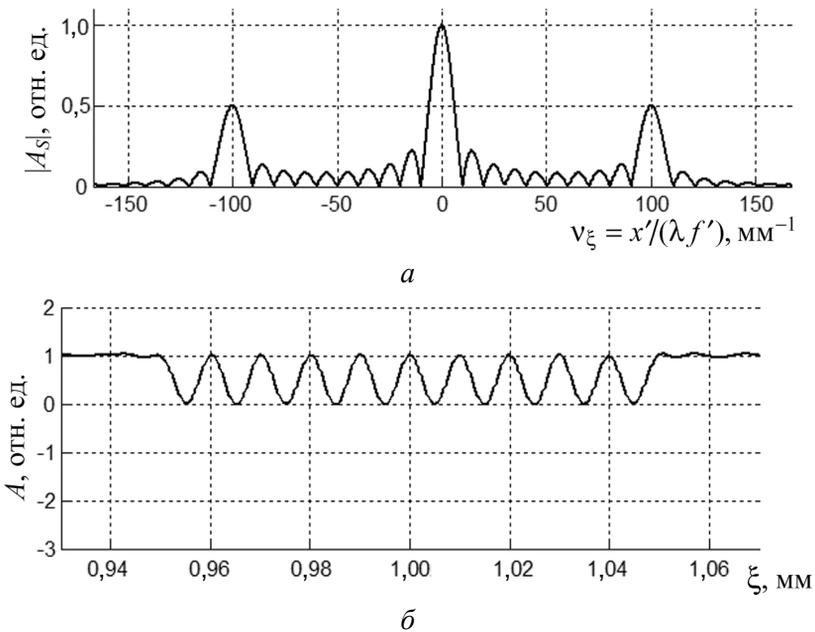


Рис. 11. Фурье-спектр (а) и восстановленное изображение (б) ограниченной решетки при дисторсии ФПО $\Delta l_{\text{дис}} = 10\lambda$

Заключение. На основе проведенных исследований показано, что aberrации ФПО при регистрации частотного спектра влияют на качество восстановленного изображения символа. Наибольшие искажения вызывают дефокусировка и сферическая aberrация, которые приводят к существенному падению контраста символа и «размытию» его границ. Наличие у ФПО комы вызывает незначительное изменение пространственной частоты на восстановленном изображении, а также небольшое «размытие» ее краев. Кривизна поля практически не влияет на вид восстановленного изображения символа. Дисторсия приводит к пренебрежимо малым изменениям частоты. Для устранения искажений необходима в первую очередь коррекция ФПО на дефокусировку и сферическую aberrацию.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Грибунин В.Г., Оков И.Н., Туринцев И.В. *Цифровая стеганография*. Москва, Солон-Пресс, 2002, 272 с.
- [2] Смирнов М.В. Голографический подход к встраиванию скрытых водяных знаков в фотографии. *Оптический журнал*, 2005, т. 72, № 6, с. 51–56.
- [3] Колочкин В. Я., Колесников М.В., Колесников В.Ю., Мосягин Г.М. Оптические методы стеганографической защиты цифровых изображений. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2010, № 1, с. 29–40.
- [4] Колочкин В.Я., Колесников М.В. Метод встраивания скрытых данных с использованием спекл-структуры. *Прикладная оптика: Сб. трудов IX Международной конф.* С.-Петербург, 2010, т. 1, с. 9–13.

Статья поступила в редакцию 03.07.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Тимашова Л.Н., Трофимов Н.Е. Исследование влияния аберраций фурье-преобразующей системы на восстановленное изображение символа в системах сокрытия информации. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 9.

URL: <http://engjournal.ru/catalog/pribor/optica/918.html>

Тимашова Лариса Николаевна родилась в 1947 г., окончила МГТУ им. Н.Э. Баумана в 1971 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Специализируется в области синтеза оптических систем различного назначения.

Трофимов Николай Евгеньевич родился в 1987 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2010 г. Аспирант кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Специализируется в области проектирования систем обработки изображений. e-mail: ntrofimov@bmsu.ru