

УДК 535.317.1

ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ ЛИНЗА ДЛЯ ОПТИЧЕСКОГО КОРРЕЛЯТОРА

Семенов Г. Б., Корешев С. Н.,
Павлов А. В. и Шубников Е. И.

В результате анализа aberrаций голограмм найдены условия регистрации голографической линзы, позволяющие обрабатывать сигналы с пространственной частотой до 15 1/мм . Экспериментально получена зависимость волновой aberrации голографической линзы от пространственной частоты обрабатываемого сигнала. Приводятся результаты испытаний линзы в схеме оптического коррелятора.

Использование голографических линз в оптических корреляторах, работающих в когерентном свете, позволяет упростить и удешевить процесс изготовления линз, уменьшить их вес и создавать более компактные оптические схемы корреляторов [1-3].

Ограничения, накладываемые aberrациями голографической оптики на информационную емкость обрабатываемых с помощью коррелятора данных, т. е. на произведение разрешающей способности на величину поля зрения, могут быть допустимыми для широкого класса приборов, работающих с информационно ограниченными изображениями, например, при вводе информации в реальном времени посредством пространственно-временных модуляторов света и телевизионного тракта. Типичные размеры кадрового окна в таких приборах не превышают обычно $20 \times 20 \text{ мм}$, а максимальная пространственная частота — $15-20 \text{ 1/мм}$.

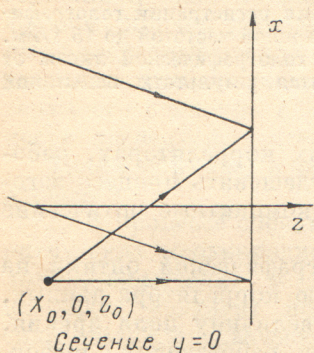
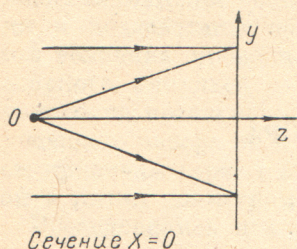
В настоящей статье на основе анализа aberrаций голографических линз показана возможность изготовления внеосевой линзы для корреляционного анализа изображений с aberrациями, аналогичными осевой линзе, приведены результаты измерения качества волнового фронта, формируемого такой линзой, и результаты испытания линзы в оптическом корреляторе.

При определении требований к качеству изображения спектра, формируемого линзой, необходимо учитывать, что корреляционный поиск интересующего фрагмента изображения осуществляется путем сравнения пространственно-частотного спектра этого фрагмента с сопряженным пространственно-частотным спектром того же самого или аналогичного ему фрагмента, зарегистрированном на согласованном фильтре [4]. При этом согласованный фильтр изготавливается для фиксированного положения фрагмента изображения в пространстве предметов, в то время как в процессе корреляционного анализа этот фрагмент может смещаться в пределах входного окна коррелятора. При наличии aberrаций смещение фрагмента изображения будет приводить к искажению его спектра и, следовательно, к уменьшению корреляционного сигнала. Таким образом, при строгом учете допустимых aberrаций голографической линзы необходимо исходить из того, чтобы разность aberrаций голографической линзы при смещении фрагмента изображения в пределах входного окна коррелятора не приводила к существенному уменьшению амплитуды корреляционного сигнала. При малых значениях aberrаций в пределах поля зрения линзы разность aberrаций также будет величиной малой.

В соответствии со сказанным при расчете голографической линзы исходили из требования, чтобы волновые aberrации линзы не превышали четверти длины волны.

При анализе aberrаций был использован метод разложения волновых aberrаций, предложенный в работе [5]. В соответствии с тем, что преобразование Фурье представляет собой разложение по плоским волнам, при записи голографической линзы одна из волн была выбрана плоской (рис. 1).

Система координат X, Y, Z выбиралась таким образом, что в сечении $X=0$ оси объектного и опорного пучков совпадали. Учитывая, что голографическая линза строит изображение в параллельных пучках лучей, и рабочая длина волны совпадает с длиной волны, на которой она зарегистрирована, можно записать выражения для коэффициентов aberrаций комы и астигматизма в следующем виде:



$$C_x = (1/R_0)^2 (x_r/R_r - x_c/R_c), \quad (1) \quad \left. \begin{array}{l} \text{сечение} \\ Y=0 \end{array} \right\}$$

$$A_x = -1/R_0 (x_r/R_r - x_c/R_c)^2 + 2x_0/R_0 (x_r/R_r - x_c/R_c), \quad (2) \quad \left. \begin{array}{l} \text{сечение} \\ X=0 \end{array} \right\}$$

$$C_y = (1/R_0)^2 (y_r/R_r - y_c/R_c), \quad (3)$$

$$A_y = -1/R_0 (y_r/R_r - y_c/R_c)^2, \quad (4)$$

где $x_r/R_r, y_r/R_r, x_0/R_0, y_0/R_0$ — синусы угловых координат источников плоской и сферической волн при регистрации голографической линзы; $x_c/R_c, y_c/R_c$ — синусы угловых координат источников плоских волн в спектре Фурье объекта при формировании изображения спектра голографической линзой; R_0 — расстояние от центра голографической линзы до источника сферической волны при записи голографической линзы.

Рис. 1. Схема регистрации голографической линзы.

Волновые aberrации W голографической линзы для плоскостей $Y=0$ и $X=0$ рассчитывались по формулам

$$W|_{y=0} = 2\pi/\lambda_c \left[\frac{1}{2} x^3 C_x - \frac{1}{2} x^2 A_x \right], \quad (5)$$

$$W|_{x=0} = 2\pi/\lambda_c \left[\frac{1}{2} y^3 C_y - \frac{1}{2} y^2 A_y \right]. \quad (6)$$

где X и Y — координаты в плоскости голографической линзы, а λ_c — длина волны, на которой осуществлялись фурье-анализ изображения и регистрация голографической линзы. Как следует из выражений (1)–(4), в рассматриваемом случае коэффициент комы зависит от разности синусов угловых координат $(x_r/R_r - x_c/R_c)$ и $(y_r/R_r - y_c/R_c)$.

Покажем, что при малых значениях обрабатываемых в корреляторе пространственных частот и при расположении входного транспаранта параллельном плоскости голографической линзы (рис. 4) разность синусов угловых координат источников r и c не зависит от несущей пространственной частоты голографической линзы. Введем обозначения: $x_r/R_r = \sin \alpha$ и $x_c/R_c = \sin(\alpha + \Delta\alpha)$. Тогда для малых значений пространственных частот сигналов на входе коррелятора $x_r/R_r - x_c/R_c \approx \Delta\alpha \cos \alpha$. Угол $\Delta\alpha$, характеризующий отклонение света в дифракционный максимум первого порядка при прохождении плоской волны через входной транспарант с изображением гармонической составляющей частотой f под углом α к плоскости транспаранта (рис. 4), можно связать с частотой гармоники f и длиной волны λ источника света выражением $\Delta\alpha = \frac{f}{\cos \alpha} \lambda$.

Отсюда разность $x_r/R_r - x_c/R_c = f\lambda$ не зависит от несущей пространственной частоты голографической линзы.

Коэффициент астигматизма в общем случае зависит как от разности синусов угловых координат, так и от положения источника сферической волны при

записи линзы (от x_0) за исключением случая, когда $x_0=0$. Последний случай особенно интересен в силу следующих причин:

1) коэффициенты aberrаций комы и астигматизма зависят только от разности синусов угловых координат источников r и s и описываются одинаковыми выражениями для осевой (3), (4) и внеосевой (1), (2) линз;

2) поскольку разность синусов угловых координат источников r и s при рассмотренных выше условиях не зависит от несущей пространственной частоты голографической линзы, то при выполнении условия $x_0=0$ может быть реализована голографическая линза с высокой дифракционной эффективностью и с aberrациями, не превосходящими aberrаций осевой линзы.

Ниже приведены результаты расчета aberrаций для трех следующих схем регистрации голографической линзы:

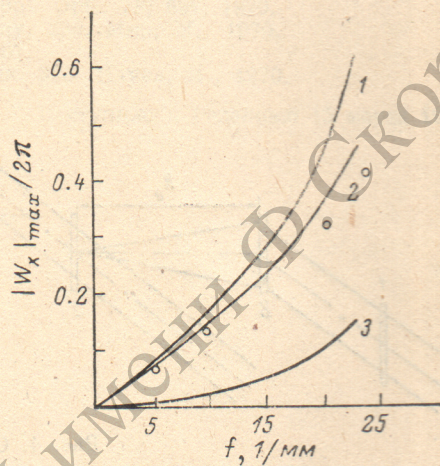
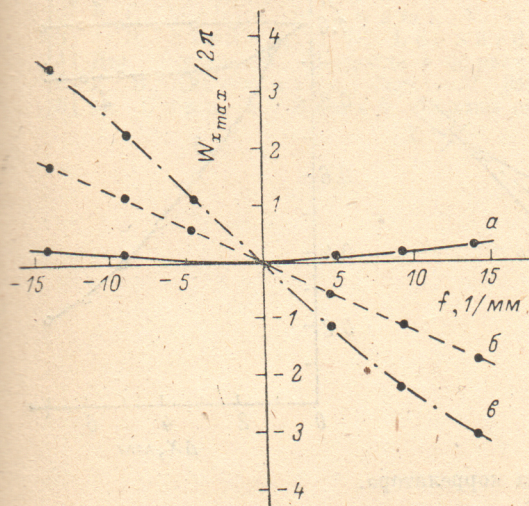


Рис. 2. График зависимости максимальных волновых aberrаций голографических линз от пространственной частоты обрабатываемого сигнала.

Рис. 3. График зависимости максимальных волновых aberrаций (1), комы (2) и астигматизма (3) от пространственной частоты обрабатываемого сигнала.

- при нормальном распространении расходящегося пучка ($x_0=0$) и наклонном распространении плоского пучка ($x_r/R_r \neq 0$);
- при наклонном и симметричном относительно нормали к фотопластинке распространении расходящегося и параллельного пучков, т. е. при $x_0/R_0 = -x_r/R_r$.
- при наклонном распространении расходящегося пучка ($x_0/R_0 \neq 0$) и нормальном распространении параллельного пучка ($x_r/R_r = 0$).

Во всех сравниваемых случаях угол между осями пучков выбирался равным 45° , что соответствует при записи на длине волны 0.63 мкм несущей пространственной частоте голографической линзы около 1500 1/мм . Фокусное расстояние линз было выбрано равным 350 мм , а их световой диаметр составлял 32 мм .

Aberrации сравниваемых линз иллюстрирует рис. 2, на котором по оси абсцисс отложены пространственные частоты обрабатываемого в корреляторе сигнала, а по оси ординат — максимальные в пределах линзы значения волновых aberrаций, выраженные в долях рабочей длины волны коррелятора. Отметим, что для сечения $x=0$ aberrации одинаковы во всех сравниваемых случаях и соответствуют aberrациям осевой голографической линзы (рис. 2, a). Кривая a характеризует aberrации линзы в сечении $y=0$ при выполнении условия $x_0=0$. Кривые b и c характеризуют aberrации линзы в сечении $y=0$ для случаев симметричного расположения осей пучков относительно нормали к поверхности линзы и нормального падения параллельного пучка лучей соответственно.

Схема записи голографической линзы, обеспечивающая минимальные aberrации, была использована для регистрации линзы, предназначенной для ра-

боты в корреляторе с размером входного кадра 20×20 мм и максимальной пространственной частотой обрабатываемых сигналов — 15 1/мм .

Линза регистрировалась на слое ЛОИ, нанесенном на высококачественную подложку из оптического стекла, и имела дифракционную эффективность 25%.

Измерение волновых aberrаций линзы осуществлялось с помощью интерферометра типа Тваймана—Грина [6], в котором сферическое зеркало было заменено на плоское. Можно показать, что при измерении волновых aberrаций линзы в таком интерферометре астигматизм компенсируется. Поскольку сферическая aberrация испытуемой голографической линзы равна нулю, такой интерферометр позволил измерить aberrацию комы. На рис. 3 приведены расчетные значения суммарной aberrации, комы и астигматизма в зависимости

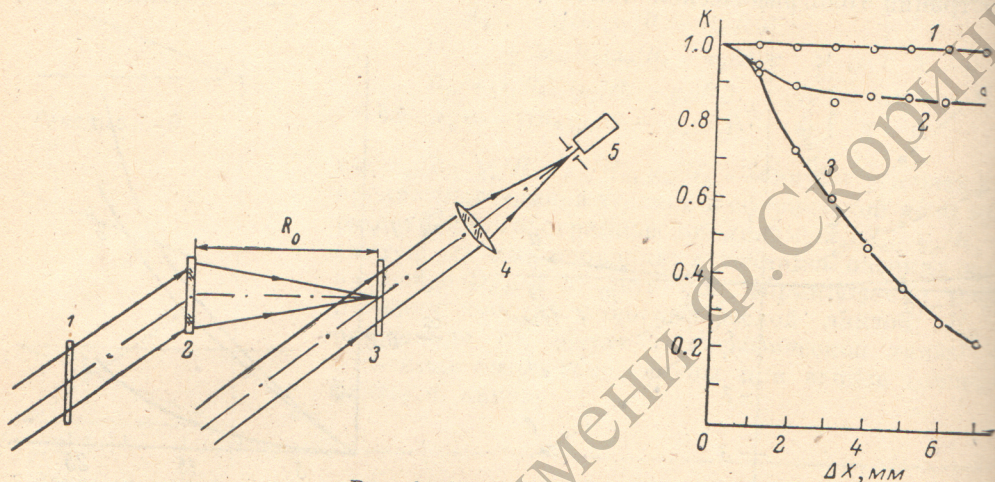


Рис. 4. Схема коррелятора.

1 — входное изображение, 2 — голографическая линза, 3 — согласованный фильтр, 4 — объектив второго преобразования Фурье, 5 — фотоприемник.

Рис. 5. График зависимости сигнала корреляции от величины смещения фрагмента изображения во входном кадре для различных диапазонов пространственных частот фильтра: 1 — до 5 1/мм , 2 — до 15 1/мм , 3 — до 36 1/мм .

пространственных частот обрабатываемых в корреляторе сигналов. На том же рисунке кружками отмечены экспериментально полученные значения комы. Как следует из рис. 3, рассчитанные и измеренные значения волновых aberrаций голографической линзы находятся в хорошем соответствии.

Линза испытывалась в голографическом корреляторе по схеме рис. 4. Предварительные измерения спектральной плотности мощности пространственного шума линзы показали незначительную ее величину, близкую к шуму рефракционных элементов. Результаты дальнейших экспериментов показали отсутствие остаточного сигнала, обусловленного собственной структурой линзы, на всех пространственных частотах.

Голографические согласованные фильтры записывались с фрагмента размером 6×6 мм изображения с экспоненциальной функцией автокорреляции (радиус корреляции 1 мм) и согласовывались на различные диапазоны пространственных частот.

Общий размер входного изображения превышал двойной размер кадрового окна коррелятора. При вычислении функции корреляции входное изображение перемещалось в кадре, и фотоэлектронным умножителем с точечной диафрагмой, сдвигаемым синхронно с входным изображением, регистрировался сигнал корреляции. Для исключения влияния неравномерности освещения входного окна и угловой селективности голографического фильтра все измерения повторялись с обычной рефракционной линзой с таким же фокусным расстоянием. Полученные результаты использовались для нормировки.

Нормированные указанным образом результаты измерений зависимости сигнала корреляции от величины смещения фрагмента изображения от централь-

ного положения в кадровом окне приведены на рис. 5 для трех различных диапазонов рабочих пространственных частот. Кривая 1 соответствует случаю работы линзы на частотах до 5 1/мм , меньших расчетных, кривых 2 — работе во всем диапазоне пространственных частот, на который рассчитана линза (до 15 1/мм) и кривая 3 — работе на частотах до 36 1/мм , значительно превосходящих расчетные. Видно, что инвариантность к смещению входного изображения ухудшается с повышением рабочих пространственных частот, однако в расчетном диапазоне частот линза работает удовлетворительно и изменение сигнала корреляции по полю незначительно.

Литература

- [1] H. R. Manjunath, S. V. Rappu. Appl. Opt., 15, 849, 1976.
- [2] P. C. Mehta, S. Swami, V. V. Rampal. Appl. Opt., 16, 445, 1977.
- [3] J. R. Fienup, C. D. Leonard. Appl. Opt., 18, 631, 1979.
- [4] Дж. Гудмен. Введение в фурье-оптику, 236. Мир, М., 1970.
- [5] E. V. Champagne. JOSA, 57, 61, 1967.
- [6] М. Борн, Э. Вольф. Основы оптики, 333. Наука, М., 1970.

Поступило в Редакцию 15 марта 1982 г.

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ имени Ф.Скорины