

УДК 535.4

**Анализ распределения интенсивности света в изображении,
восстановленном с цифровой голограммы Фурье, в системе оптико-
голографической памяти**

Соловьёва А.А., студент

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Радиоэлектроника и лазерная техника»*

*Научные руководители: Вереникина Н.М., д.т.н., доцент
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,*

*Одинокое С.Б., д.т.н., доцент
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана*

МГТУ им. Н.Э. Баумана
baryshnikov@bmstu.ru

Быстрое развитие современных технологий и постоянно растущие объемы информации требуют новых подходов к вопросу хранения и обработки данных. Одним из решений этой задачи может стать оптико-голографическая память.

Работы по созданию оптико-голографической памяти начались еще в 60-х годах прошлого столетия, но и на сегодняшний день это направление не потеряло своей актуальности. Безусловно, голографическая память по сравнению с другими видами памяти имеет ряд преимуществ, таких как:

- обмен данными происходит целыми страницами, а не по одному биту, как при обычной оптической записи;
- мультиплексность, т.е. запись большого объема информации на единицу регистрирующей среды с помощью изменения длины волны лазера, угла падения или фазы опорного пучка, а так же путем сдвига носителя;
- высокая надежность, т.к. дефекты на поверхности голограммы не приводят к потере данных;
- использование различных регистрирующих сред, позволяющих хранить информацию в течение длительного времени. Срок хранения может достигать 50 лет.

Особое внимание в оптико-голографических системах памяти уделяется получению цифровых или, так называемых, бинарных голограмм Фурье. В бинарных системах информация закодирована в виде набора прозрачных и непрозрачных элементов, соответствующих логическому 0 или 1.

Как правило, оптико-голографическая система хранения информации содержит следующие компоненты: лазер, устройство для разделения и совмещения лазерных пучков, пространственно-временной модулятор света (ПВМС), фоточувствительную регистрирующую среду и фотоприемное матричное устройство.

Пучок, идущий от лазера, разделяют на два: опорный и предметный. Опорный луч сохраняют неизменным, а с помощью предметного пучка обеспечивают запись данных. ПВМС преобразует входной цифровой сигнал, представленный последовательностью нулей и единиц, в матрицу черных и белых точек. Предметный луч, проходя через ПВМС, создает точную копию его текущего состояния. Затем опорный и предметный пучки проецируют на регистрирующую среду, и осуществляют запись интерференционной картины, в которой заложена необходимая информация. При считывании голограмму освещают таким опорным пучком, что использовался при записи (под тем же углом и с той же длиной волны), и в результате дифракции света получают восстановленное изображение, которое регистрируют с помощью фотоприемного устройства.

Особенностью получения цифровых голограмм является использование схемы без опорного пучка.

При проектировании системы записи или считывания оптико-голографической памяти, необходимо ясно представлять не только алгоритм преобразований, но и понимать физические процессы, лежащие в их основе. Данный анализ станет начальной ступенькой при проектировании системы, а в частности будет полезен при габаритном расчете.

Чтобы получить распределение интенсивности света в изображении, восстановленном с цифровой голограммы Фурье, необходимо проанализировать два основных процесса: запись голограммы и ее считывание.

Сначала рассмотрим процесс записи цифровой голограммы Фурье.

Входной транспарант представлен на рис.1.

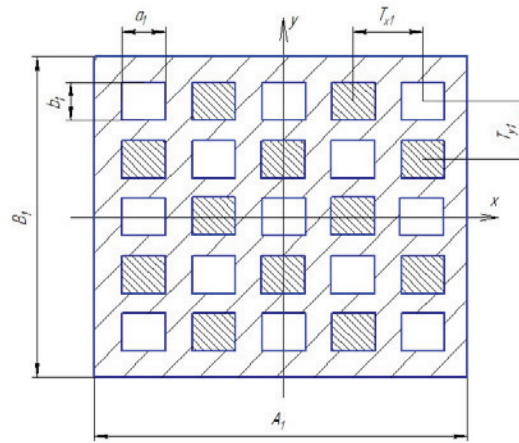


Рис.1. Геометрические характеристики входного транспаранта

Введем следующие обозначения: A_1 и B_1 – геометрические размеры транспаранта, a_1 и b_1 – размеры одного элемента, T_{x1} и T_{y1} – период или шаг дискретизации, $M \times N$ – количество элементов. Функция пропускания излучения входного транспаранта по амплитуде описывается следующим выражением:

$$h_{mp}(x; y) = \left[\text{rect}\left(\frac{x}{a_1}; \frac{y}{b_1}\right) \otimes \left(\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N C_{mn} \cdot \delta(x - m \cdot T_{x1}; y - n \cdot T_{y1}) \right) \right] \cdot \text{rect}\left(\frac{x}{A_1}; \frac{y}{B_1}\right),$$

где коэффициент C_{mn} принимает значение, равное 0 или 1, в зависимости от поступающего сигнала. Тогда распределение амплитуды на транспаранте:

$$R(x; y) = r_0 \cdot h_{mp}(x; y),$$

где r_0 – начальная амплитуда.

С помощью схемы, показанной на рис.2, осуществляется пространственная модуляция исходного транспаранта и запись голограммы. Считаем, что оптическая система идеальная, т.е. не вносит aberrаций и имеет бесконечный размер входного зрачка.

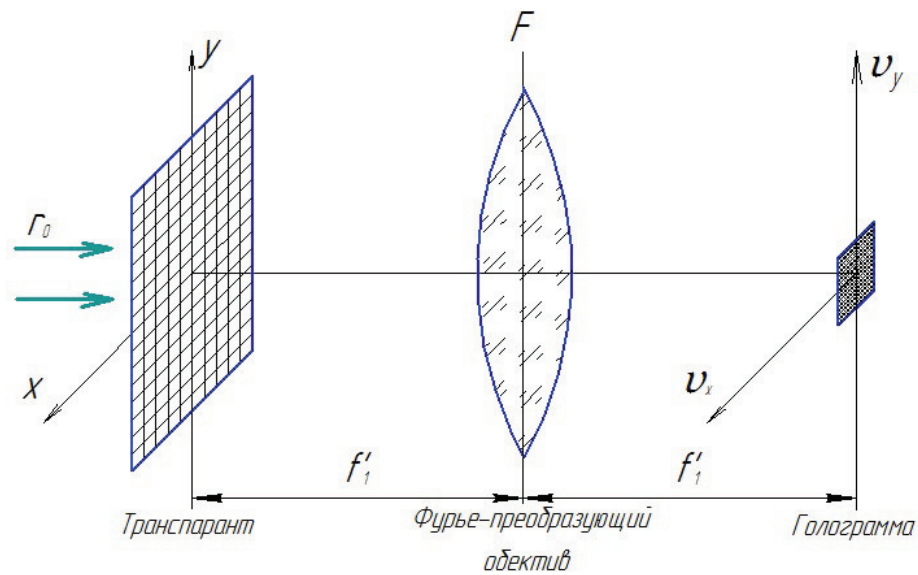


Рис.2. Схема записи голограммы Фурье

Спектр амплитуд, зарегистрированный на голограмме:

$$R'(v_x; v_y) = \frac{r_0}{i\lambda_1 f'_1} \cdot F\{h_{mp}(x, y)\},$$

где $v_x = x/\lambda_1 f'_1$; $v_y = y/\lambda_1 f'_1$ – пространственные частоты. Взяв Фурье-преобразование от функции пропускания излучения транспаранта, получим:

$$R'(v_x; v_y) = \frac{r_0}{i\lambda_1 f'_1} \cdot \frac{a_1 b_1}{T_{1x} T_{1y}} \cdot \text{sinc}(\pi a_1 v_x; \pi b_1 v_y) \cdot A_1 B_1 \cdot \left[\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N C_{mn} \cdot \text{sinc}\left(\pi A_1 \left(v_x - \frac{m}{T_{x1}}\right); \pi B_1 \left(v_y - \frac{n}{T_{y1}}\right)\right) \right]$$

Одномерный вид функции $|R'(v_x)|$ показан на рис.3.

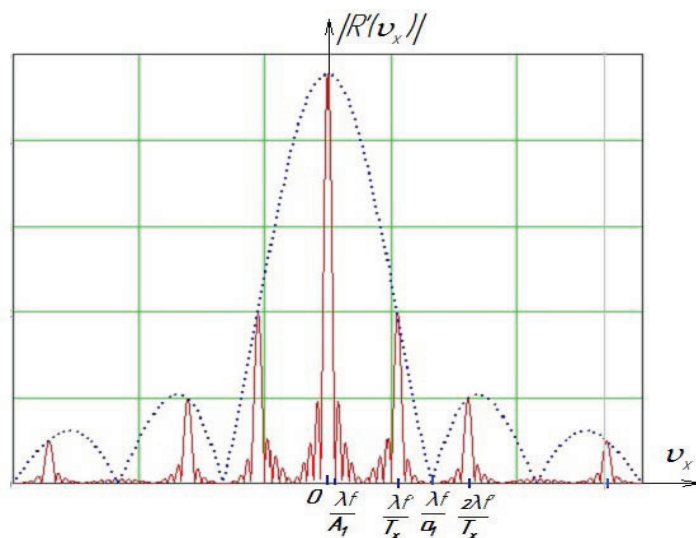


Рис.3. Распределение амплитуды регистрируемой волны в плоскости голограммы

На практике процессы записи и восстановления голограмм происходят на разных установках. И при считывании габариты голограммы также будут оказывать влияние на структуру восстановленного изображения. Следовательно, функция пропускания излучения голограммой примет следующий вид:

$$h_z(v_x; v_y) = F\{h_{mp}(x; y)\} \cdot \text{rect}\left(\frac{v_x}{a_2}; \frac{v_y}{b_2}\right),$$

где a_2 и b_2 – размеры голограммы.

Схема для восстановления голограммы показана на рис.4, где носитель помещается вплотную к оптической системе. Это дает дополнительный фазовый сдвиг в амплитуде, но не оказывает влияния на интенсивность света, зато позволяет сократить габариты системы.

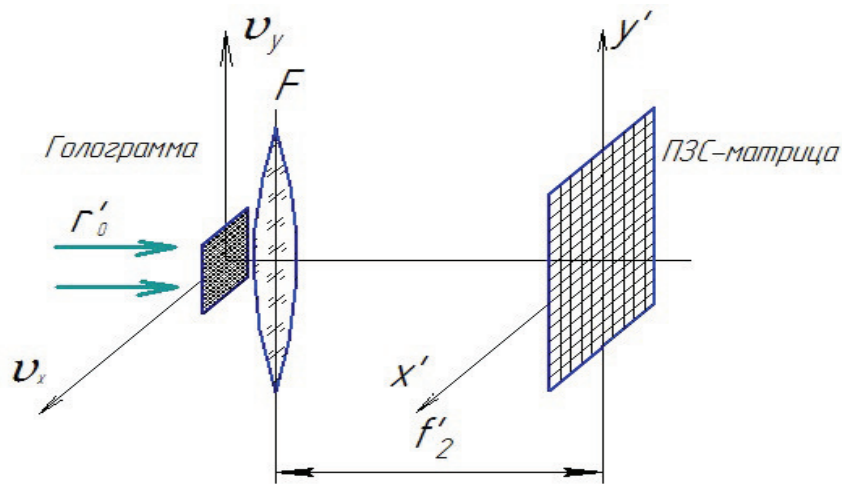


Рис.4. Схема восстановления голограммы Фурье

Распределение амплитуды восстановленной волны в плоскости установки ПЗС - матрицы:

$$R''(x'; y') = \frac{r'_0 \cdot \exp [i\pi\lambda_2 f'_2 (v_x^2 + v_y^2)]}{i\lambda_2 f'_2} \cdot \left[F \left\{ F \{ h_{mp}(x; y) \} \right\} \otimes \text{sinc}(\pi a_2 x'; \pi b_2 y') \right];$$

$$x' = \lambda_2 f'_2 v_x = \frac{\lambda_2 f'_2}{\lambda_1 f'_1} x; \quad y' = \lambda_2 f'_2 v_y = \frac{\lambda_2 f'_2}{\lambda_1 f'_1} y; \quad r'_0 = \frac{r_0}{i\lambda_1 f'_1}$$

Введем линейное увеличение оптико-голографической системы:

$$V = \frac{\lambda_1 f'_1}{\lambda_2 f'_2}$$

Воспользуемся свойством преобразования Фурье:

$$F\{F\{S(x)\}\} = S(-x)$$

С учетом этого свойства выражение для распределения амплитуды восстановленной волны примет вид:

$$R''(x'; y') = r''_0 \cdot [h_{\text{тр}}(-Vx'; Vy') \otimes \text{sinc}(\pi a_2 x'; \pi b_2 y')],$$

где $r''_0 = -r_0/(\lambda_1 f'_1 \lambda_2 f'_2)$ – начальная амплитуда в плоскости установки ПЗС-матрицы.

Как известно функция пропускания излучения по интенсивности связана с функцией пропускания излучения по амплитуде следующим выражением:

$$H(x; y) = |h(x; y)|^2$$

В таком случае распределение интенсивности света в изображении, восстановленном с цифровой голограммы Фурье, будет описываться выражением:

$$I(x'; y') = \frac{r_0^2}{\lambda_1^2 f_1'^2 \cdot \lambda_2^2 f_2'^2} \cdot [h_{\text{тр}}^2(-Vx'; Vy') \otimes \text{sinc}^2(\pi a_2 x'; \pi b_2 y')]$$

На рис.5 показан вид восстановленной нулевой строки ($y=0$) входного транспаранта.

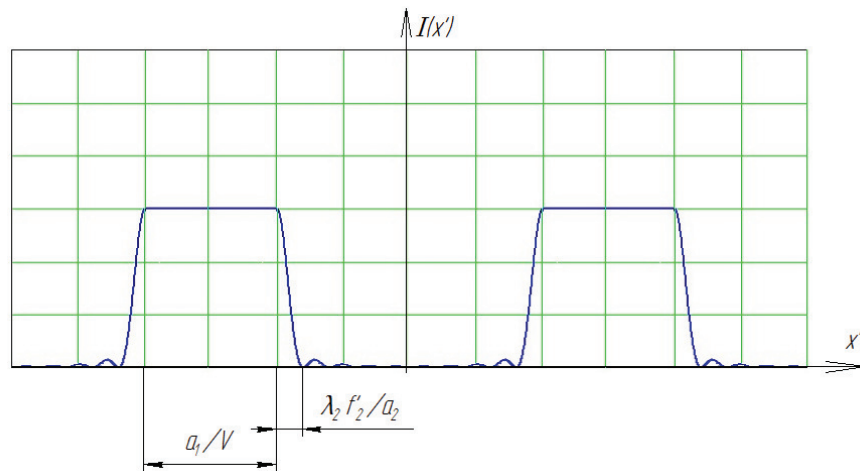


Рис. 5. Распределение интенсивности света в изображении, восстановленном с цифровой голограммы Фурье

Как видно из рис.5, восстановленное изображение каждого элемента входного транспаранта будет иметь некоторое размытие, обусловленное дифракцией. Диаметр пятна размытия определяется размерами элемента транспаранта (a_1, b_1) и геометрическими размерами зарегистрированной голограммы (a_2, b_2). Эта зависимость описывается следующим выражением:

$$D = \frac{a_1}{V} + \frac{2\lambda_2 f'_2}{a_2}$$

Очевидно, что размер пятна размытия повлияет на размер ячейки ПЗС-матрицы. К тому же сигнал с одного элемента ПЗС-матрицы определяется не только пропусканием соответствующей ячейки входного транспаранта, но зависит и от пропускания окружающих его ячеек. Следовательно, наложение помех от соседних ячеек может привести к ложному сигналу, а также неправильной работе всего устройства.

Соответственно, по результатам данного анализа, зная начальные условия, т.е. все размеры входного транспаранта и имея записанную голограмму, можно рассчитать систему для восстановления голограмм, в том числе определить размеры ПЗС-матрицы, необходимые для эффективного считывания.

Список литературы

1. Ярославский Л.П., Мерзляков Н.С. Цифровая голография. М.: Наука, 1982. 219 с.
2. Оптическая голография /Р.Кольер [и др.] М.: Мир, 1973.
3. Leonid Yaroslavsky Introduction to Digital Holography // L. Yaroslavsky, J. Astola Digital Signal Processing in Experimental Research, 2012. 197 с.