

УДК 535.421

## МЕТОДЫ СИНТЕЗА ГОЛОГРАММ СФОКУСИРОВАННОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

© 2013 г. С. Н. Корешев, доктор техн. наук; И. Н. Корепин, аспирант

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий механики и оптики, Санкт-Петербург

E-mail: korepin404@gmail.com

Рассмотрены основные этапы синтеза голограмм сфокусированного изображения. Установлено, что ключевой задачей синтеза при наличии аберраций проекционного объектива является вычисление комплексной амплитуды объектной волны в плоскости голограммы. Разработан высокопроизводительный метод решения этой задачи.

*Ключевые слова:* голография, фотолитография, голограмма сфокусированного изображения, синтезированная голограмма.

Коды OCIS: 090.1760

*Поступила в редакцию 30.04.2013*

### Введение

В современной литературе имеются сведения о разработках голографических фотолитографических систем на основе многих видов голограмм, в частности, голограмм Френеля [1], голограмм сфокусированного изображения [2], а также синтезированных голограмм разных видов [3]. Наиболее интересными из них представляются системы, основанные на использовании синтезированных голограмм. Преимущество таких голограмм, по сравнению с физически полученными голограммами, состоит в том, что процесс их получения не требует изготовления фотошаблона.

Синтезированные голограммы могут быть рассчитаны на основе одной из двух основных моделей. Первая модель воспроизводит процесс записи голограммы Френеля, используя в качестве объекта цифровое изображение необходимого предмета. Вторая модель основана на алгоритмах, описывающих процесс записи голограммы сфокусированного изображения с учетом изображающих свойств того объектива, который предполагается использовать при восстановлении.

Известно, что применение синтезированных голограмм-проекторов Френеля не позволяет восстанавливать изображения структур с характеристическим размером менее  $1,5\lambda$  [4]. Это ограничение связано с необходимостью пространственного разделения порядков дифракции дискретных голограмм. Там же отмечается необходимость использования для отображения такой голограммы на носителе генератора изображения, характеризующегося диаметром фокального пятна, составляющим одну четверть минимального размера элемента структуры объекта. В случае же использования проекционных систем с синтезированной голограммой сфокусированного изображения (СГСИ) указанные выше ограничения могут быть существенно смягчены или сняты вовсе при соответствующем выборе увеличения проекционного объектива, входящего в состав этих систем [5]. Отметим, что, несмотря на наличие в такой проекционной системе дополнительного элемента – проекционного объектива, она является более простой и недорогой по сравнению с традиционными системами фотолитографии. Так в работе [2] описан эксперимент, в результате

которого было получено изображение с близким к дифракционному пределу линейным размером элемента – 0,81 мкм. И это при использовании проекционной системы, состоящей из голограммы сфокусированного изображения и объектива, характеризующегося размером пятна рассеяния на краю поля, равным 26 мм.

Отмеченные преимущества изображающих свойств проекционных систем с СГСИ и отсутствие в доступной авторам литературе информации об успешном синтезе таких голограмм обусловили необходимость поиска методов для практического создания СГСИ, пригодных для использования в высокоразрешающем фотолитографическом процессе.

### Синтез голограмм сфокусированного изображения

Задача синтеза СГСИ состоит в вычислении распределения интенсивности по апертуре голограммы в ходе математического моделирования физического процесса аналоговой записи голограмм. Рассчитанное распределение интенсивности волнового фронта (ВФ) может быть отображено на слое регистрирующей среды, например фоторезиста, с помощью лазерного или электронного генератора изображений. Полученная голограмма восстанавливается пучком, комплексно-сопряженным виртуальному опорному пучку. При этом проекционный объектив работает в обратном ходе лучей, т. е. аберрации, вносимые им на этапе синтеза голограммы, компенсируются противоположными по знаку аберрациями, вносимыми при восстановлении.

Физический процесс формирования голографического поля сфокусированного изображения является сложением комплексной амплитуды объектной волны, дифрагированной на структуре фотосаблона и прошедшей через проекционную оптическую систему (ОС), и амплитуды опорной волны, падающей под углом на плоскость регистрации голограммы. Интенсивность суммарной волны может быть описана следующим выражением:

$$I = OO^* + RR^* + OR^* + RO^* = I_O + I_R + OR^* + O^*R, \quad (1)$$

где  $I$  – интенсивность голографического поля,  $O$  – комплексная амплитуда объектной волны,  $R$  – комплексная амплитуда опорной волны,

$O^*$  и  $R^*$  – величины, комплексно-сопряженные амплитудам  $O$  и  $R$ .

Поскольку в процессе записи голограммы используется проекционная ОС, то при математическом моделировании возникает необходимость учета ее влияния на комплексную амплитуду объектной волны посредством вычисления дискретных значений комплексной функции ее пропускания. Еще одним важным фактором, влияющим на возможность формирования дифракционно-ограниченного изображения объекта при восстановлении голограммы, является бинаризация голографического поля по интенсивности. Причина необходимости введения бинаризации заключается в чрезвычайной сложности изготовления “полутоновой” голограммы с помощью генератора изображений, работающего на пределе его разрешающей способности.

Отметим, что задачи вычисления амплитуды опорной волны, сложения комплексных амплитуд двух волн и бинаризации голограммы по интенсивности аналогичны соответствующим задачам синтеза голограмм-проекторов Френеля, рассмотренным в работе [3]. Таким образом, ключевая задача создания алгоритма синтеза СГСИ состоит в разработке метода расчета комплексной амплитуды объектной волны, учитывающего характеристики реальной проекционной ОС.

При поиске и анализе возможных путей ее решения необходимо основываться на предельных параметрах синтеза и восстановления СГСИ [5], при которых не происходит ухудшения качества восстанавливаемого изображения по сравнению с его дифракционным пределом. В частности, в этой работе были получены следующие выражения для максимальных периодов дискретизации входного ( $d_d$ ) и выходного ( $d'_d$ ) зрачков ОС:

$$d_d \leq \frac{1}{2} T_{d \min} \leq \frac{\lambda}{4 \sin \alpha} \leq \frac{a_t}{4}, \quad (2)$$

$$d'_d \leq \frac{1}{2} T'_{d \min} \leq \frac{\lambda}{4 \sin \alpha'} \leq \frac{a_t \beta}{4}, \quad (3)$$

где  $T_{d \min}$  и  $T'_{d \min}$  – минимальные пространственные периоды функции ВФ, соответственно, во входном и выходном зрачках,  $\lambda$  – рабочая длина волны,  $\alpha$ ,  $\alpha'$  – передний и задний апертурные углы,  $a_t$  – минимальный характеристический размер структуры предмета,  $\beta$  – линейное увеличение проекционного объектива.

Кроме того, в этой же работе приведены выражения, позволяющие исходя из необходимости “захвата” всего излучения, несущего полезную информацию о структуре фотошаблона, рассчитать минимально допустимые размеры входного и выходного зрачков ОС  $D_d$  и  $D'_d$  соответственно. Эти выражения приведены ниже

$$D_d = 2R \operatorname{tg}[\arcsin(\lambda/a_i)] + D_i, \quad (4)$$

$$D'_d = 2R' \operatorname{tg}\{\arcsin[\lambda/(a_i \beta)]\} + D_g, \quad (5)$$

где  $R$  – расстояние от плоскости фотошаблона до плоскости входного зрачка ОС,  $R'$  – расстояние от выходного зрачка ОС до плоскости голограммы,  $D_i$  – размер фотошаблона,  $D_g$  – размер голограммы.

Частные от деления выражений (4) на (2) и (5) на (3) позволяют определить минимальное количество точек в зрачках ОС, в которых необходимо вычислять aberrации при синтезе СГСИ. Грубая оценка этой величины при рабочей длине волны 0,488 мкм, минимальном характеристическом размере элемента 1 мкм ( $2\lambda$ ) и размере поля 15 мм соответствует значению порядка 130 тысяч точек. Очевидно, что такой объем вычислений является весьма трудоемкой задачей для существующих программ автоматизированного расчета ОС. Таким образом, возникает необходимость выбора наиболее подходящего, с точки зрения точности и скорости вычислений, метода расчета комплексной амплитуды объектной волны в плоскости голограммы.

#### Методы вычисления комплексной амплитуды объектной волны при синтезе СГСИ

В работе [3] для решения аналогичной задачи при синтезе голограмм Френеля предлагает применение метода, основанного на вычислении вектора электромагнитного поля. Его суть заключается в вычислении в каждой точке голограммы комплексной амплитуды, формируемой всеми точками исходного объекта. Так как в настоящей работе, как и в работе [3], рассматривается случай, при котором виртуальный фотошаблон освещается параллельным когерентным пучком, перпендикулярно падающим на поверхность, то излучение, дифрагировавшее на фотошаблоне, в плоскости самого фотошаблона можно считать когерентными с одина-

ковой начальной фазой. Поэтому набег фазы ( $\varphi_i$ ) от источника до точки на заданной плоскости будет зависеть лишь от длины волны и расстояния между источником и точкой плоскости  $l$

$$\varphi_i = 2\pi l_i / \lambda,$$

где  $i$  – индекс ячейки массива, описывающего плоскость,  $l_i$  – расстояние от точечного источника до  $i$ -й точки плоскости. При этом  $l$  будет определяться выражением

$$l_i = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + h^2},$$

где  $x_i, y_i$  – координаты точки на рассматриваемой плоскости,  $x_j, y_j$  – координаты на фотошаблоне,  $h$  – расстояние между плоскостями. Сумма комплексных амплитуд от всех источников будет равна амплитуде объектной волны в этой точке. Применение предложенного метода для случая СГСИ требует учета влияния ОС на ВФ. Соответствующая модификация данного метода заключается в вычислении распределения комплексной амплитуды в три этапа. На первом этапе с помощью рассмотренного выше метода вычисляется распределение комплексной амплитуды в плоскости входного зрачка ОС. Далее, для каждой точки входного зрачка вычисляется функция комплексного пропускания ОС. Таким образом, рассчитывается распределение комплексной амплитуды в плоскости выходного зрачка. Затем, аналогично первому этапу, вычисляется окончательное распределение комплексной амплитуды объектной волны в плоскости голограммы.

Поскольку рассмотрение энергетических характеристик выходит за рамки данной работы, то функцию комплексного пропускания ОС с точностью до постоянного множителя можно описать с помощью выражения

$$f(x, y) = \begin{cases} \exp[-2\pi i W(x, y)], & x^2 + y^2 \leq R^2 \\ 0, & x^2 + y^2 > R^2 \end{cases},$$

где  $x, y$  – координаты точки на входном зрачке,  $W(x, y)$  – функция волновой aberrации (ВА), выраженная в единицах длин волн,  $R$  – радиус входного зрачка.

Значения ВА можно вычислить на основании коэффициентов полиномов Цернике, данные о которых могут быть получены с помощью большинства распространенных программ для автоматизированного расчета оптики. При этом функцию ВА можно представить в виде ее

разложения в ряд по радиальным полиномам Цернике

$$W(\rho, \varphi) = A_{00} + \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_{n=2}^{\infty} A_{n0} R_n^0(\rho) + \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^n A_{nm} R_n^m(\rho) \cos(m\varphi), \quad (6)$$

где  $n \geq m$ ,  $(n - m)$  – четное число,  $A_{00}$ ,  $A_{n0}$ ,  $A_{nm}$  – коэффициенты полиномов,  $R_n^m(\rho)$  – радиальные коэффициенты полиномов

$$R_n^{\pm m}(\rho) = \sum_{s=0}^{\frac{n-m}{2}} (-1)^s \frac{(n-s)!}{s! \left(\frac{n+m}{2} - s\right)! \left(\frac{n-m}{2} - s\right)!} \rho^{n-2s}. \quad (7)$$

Итак, вычисление функции ВА сводится к следующему порядку действий:

- перебор всех элементов массива коэффициентов полиномов,
- циклическое вычисление радиальных полиномов Цернике для каждого известного коэффициента по формуле (7),
- суммирование вычисленных значений по формуле (6).

Данный метод позволяет вычислить распределение комплексной амплитуды объектной волны по плоскости голограммы с большой точностью при условии достаточно большого количества узлов интерполяции в полиномах Цернике. Однако, в существующих программах для автоматического расчета ОС количество узлов интерполяции, как правило, слишком мало, чтобы адекватно вычислить значение ВА системы невысокого качества, т. е. системы, не являющейся дифракционно-ограниченной. Кроме того, в связи с необходимостью промежуточного вычисления амплитуды в плоскости входного зрачка затраты времени на вычисление комплексной амплитуды объектной волны, даже для одной точки фотошаблона, становятся неприемлемо большими.

Ввиду указанных выше недостатков данный метод не подходит для вычисления комплексной амплитуды объектной волны СГСИ в плоскости голограммы.

Другим подходом к решению поставленной задачи при синтезе СГСИ может явиться метод, основанный на вычислении свертки функции сигнала с импульсной характеристикой ОС. Если вычислять свертку через частотную об-

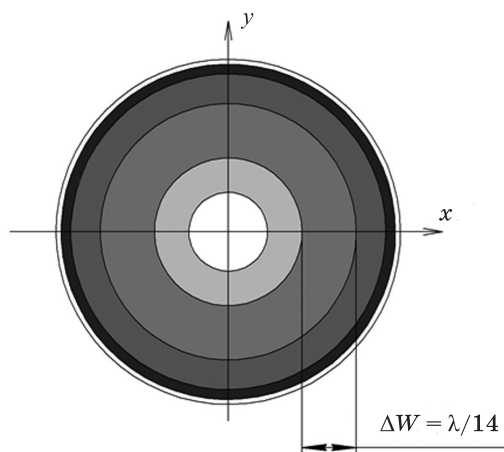


Рис. 1. Разбиение поля предмета на изопланатические зоны.  $\Delta W$  – ВА,  $\lambda$  – рабочая длина волны.

ласть, то итоговое распределение комплексной амплитуды в плоскости голограммы при когерентном освещении будет описываться выражением

$$E(x, y) = F^{-1}\{F[G(x, y)]f(x, y)\}, \quad (8)$$

где  $F$  и  $F^{-1}$  – операторы прямого и обратного преобразования Фурье соответственно,  $G(x, y)$  – функция предмета,  $f(x, y)$  – функция комплексного пропускания ОС.

Для вычисления ВА ОС в этом методе предлагается использовать алгоритм, основанный на разбиении плоскости объекта на изопланатические зоны (рис. 1), т. е. области, внутри которых функция ВА меняется слабо.

В соответствии с ним на первом этапе необходимо провести разбиение плоскости объекта на области, внутри которых значение ВА меняется не более чем на некоторое выбранное значение, например, равное критерию Марешаля, т. е.

$$\Delta W \leq \lambda / 14. \quad (9)$$

Для того чтобы выполнить такое разбиение необходимо провести расчет нескольких пробных лучей через ОС, что можно осуществить в программе для автоматизированного расчета, такой как Zemax или OPAL PC. Отметим, что чем хуже качество рассматриваемой ОС, тем больше пробных лучей необходимо рассчитывать. Для центра каждой полученной зоны с помощью программы для автоматизирован-

ного расчета оптики вычисляется значение ВА. Полученное значение сохраняется в отдельную ячейку массива, образующего дискретную функцию ВА по полю. Далее вычисляется комплексная амплитуда объектной волны согласно выражениям (8, 9).

Такой метод расчета комплексной амплитуды объектной волны позволяет уменьшить количество вычислений по сравнению с предыдущим методом. Однако при применении систем с большими абберациями сильно увеличивается количество изопланатических зон, что существенно снижает производительность. Кроме того, по сравнению с предыдущим, он дает менее точный результат. В связи с этим данный метод также не приемлем для решения поставленной задачи.

Еще один возможный способ вычисления комплексной амплитуды объектной волны в плоскости голограммы заключается в простом расчете необходимого количества реальных лучей от каждой светлой точки предмета. При этом пучок лучей от каждой из них ограничивается конусом с телесным углом при вершине, равным двум апертурным углам, а количество необходимых лучей, равномерно распределенных внутри конуса, определяется на основании выражений (2–5). Трудоемкость данного процесса пропорциональна количеству поверхностей в системе, а также количеству лучей. Поэтому данный метод плохо подходит для его реализации в алгоритме вычисления комплексной амплитуды объектной волны.

В связи с чрезвычайной сложностью применения рассмотренных выше методов вычисления амплитуды объектной волны, обусловленной свойственным им и перечисленным выше ограничениям, авторами статьи был разработан метод, основанный на замене многократных однотипных вычислений на операцию простого поиска в массиве. Такой подход хорошо зарекомендовал себя в тех областях науки и техники, где требуется выполнять многократные однотипные вычисления. В зарубежной литературе он носит название *"lookup table method"*. Схожий метод применяется и в различных алгоритмах синтеза голограмм. Так, в работах [6–9] рассмотрены алгоритмы, в которых проводится разбиение объекта на типовые участки (точки и полигоны), для которых вычисляется голографическое поле объектной волны. Рассчитанное таким образом поле сохраняется в компьютере, образуя "ячейку" таблицы соответствия. Итоговое распределение интенсивности на го-

лограмме рассчитывается путем сложения элементарных интенсивностей, соответствующих типовым участкам, на которые разбит объект.

При решении рассматриваемой задачи предлагается использовать аналогичную методику вычисления голографического поля объектной волны с той разницей, что "ячейкой" таблицы соответствия является не интенсивность типового участка объекта, как в работах, приведенных выше, а комплексная амплитуда точки пространства предметов проекционного объектива (рис. 2). Такая элементарная "ячейка" представляет собой двумерный массив комплексных чисел, в котором хранится комплексная амплитуда пятна рассеяния сформированного одной точкой поля объекта.

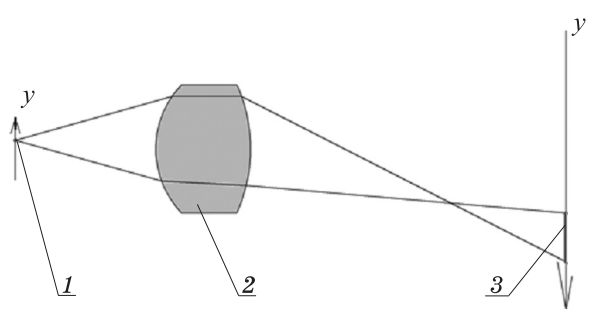


Рис. 2. Формирование элементарной "ячейки" таблицы соответствия. 1 – точка предмета, 2 – проекционная ОС, 3 – элементарная "ячейка" таблицы соответствия.

Пятно рассеяния вычисляется с помощью расчета реальных лучей через проекционный объектив от одной точки поля. Несмотря на большую трудоемкость такого вычисления для всех точек поля, эта операция должна быть выполнена лишь один раз для каждого объектива. Поэтому данный этап синтеза голограммы не зависит от структуры конкретного объекта и может считаться "предварительным" этапом вычисления комплексной амплитуды объектной волны.

На следующем этапе, который условно можно назвать "основным", происходит сложение пятен рассеяния, соответствующих точкам структуры объекта. При этом необходимо определить координаты каждой точки массива пятна рассеяния относительно оптической оси. Исходя из геометрических соображений эти координаты могут быть получены с помощью следующего выражения:

$$\begin{cases} x_k = x_c - \Delta m d_{dg}, \\ y_k = y_c - \Delta n d_{dg} \end{cases} \quad (10)$$

где  $k$  – индекс точки массива пятна рассеяния, для которой вычисляются координаты,  $x_c, y_c$  – координаты в плоскости изображения луча, “запущенного” параллельно оптической оси,  $\Delta m, \Delta n$  – расстояние между координатами центрального луча и левого нижнего угла массива, выраженное в количестве элементов массива,  $d_{dg}$  – период дискретизации голограммы. С учетом выражения (10) итоговая комплексная амплитуда голографического поля объектной волны в точке массива голограммы с индексами  $(i, j)$  будет описываться выражением

$$A_{i,j} = \sum_{k=1}^{k=N} A_{ik,jk}, \quad (6)$$

где  $N$  – количество ячеек “таблицы поиска”, в область которых, в соответствии с выражением (10), попадает точка голограммы,  $A_{i,j}, A_{ik,jk}$  – комплексная амплитуда точки внутри элементарной ячейки.

Применение данного подхода позволяет избежать большинства ограничений, свойственных другим методам, рассмотренным ранее. В частности, точность вычисления комплексной амплитуды зависит лишь от выбора количества лучей, необходимых для вычисления ячейки. Благодаря разделению процесса вычисления комплексной амплитуды на два этапа требования к минимизации вычислительных ресурсов компьютера и времени расчета становятся не столь критичными параметрами, так как “основной” этап вычисления происходит быстро и требует минимума вычислительных ресурсов. Кроме того, такое разделение позволяет оставить “рассмотрение” структуры ОС за рамками алгоритма синтеза голограммы, выделив “предварительный” этап в отдельный программный модуль. Однако, ввиду большого количества точек поля предмета, каждая из которых формирует отдельную ячейку таблицы соответствия, а также из-за большого размера пятен рассеяния для хранения таблицы соответствия требуется очень большое количество дискового пространства компьютера. Этот недостаток приводит к необходимости модификации метода с целью сокращения требуемой памяти.

Поскольку методы сжатия данных, основанные на потере части полезной информации, не приемлемы для данной задачи, такое сокра-

щение может быть выполнено двумя способами. Первый способ подразумевает сокращение объема данных в каждой элементарной ячейке таблицы соответствия. Такое сокращение может быть достигнуто применением стандартных компьютерных алгоритмов сжатия данных без потерь, например алгоритмов Лемпеля–Зива–Велча или цепей Лемпеля–Зива–Маркова. Они дают хорошую степень сжатия данных при условии их большой однородности. Кроме этого они позволяют подобрать оптимальный компромисс между скоростью работы и степенью сжатия. Так как упомянутые алгоритмы реализованы на многих языках программирования, а также достаточно хорошо документированы, их рассмотрение выходит за рамки данной работы.

Второй способ сокращения требуемой памяти компьютера основан на сокращении количества ячеек, требуемых для полного описания объектной волны голограммы. Это количество может быть сокращено благодаря осевой симметрии проекционного объектива, применяемого при синтезе голограммы. В силу этой симметрии пятна рассеяния, соответствующие точкам, равноудаленным от оптической оси, будут отличаться друг от друга только поворотом на некоторый угол. Таким образом, для сокращения избыточности информации на “предварительном” этапе синтеза достаточно проводить расчет только одного ряда точек поля объекта, расположенных вдоль одной из полуосей  $x$  или  $y$ . Пятна рассеяния остальных точек могут быть получены поворотом соответствующего массива-ячейки на необходимый угол.

Задача поворота массива заключается в вычислении новых координат каждой точки массива. При этом следует учитывать, что поворот элементарной ячейки должен осуществляться относительно точки с координатами, соответствующими координатам луча, “запущенного” вдоль оптической оси, которая, в общем случае, может не совпадать с геометрическим центром пятна рассеяния (рис. 3). Эта особенность обусловлена влиянием на структуру пятна рассеяния таких aberrаций как кома или астигматизм. Учитывая сказанное выше, алгоритм поворота будет состоять из трех операций

- сдвиг системы координат,
- поворот относительно нового центра координат,
- возврат к старой системе координат.

Таким образом, вычисление новых координат точки массива  $(x', y')$  можно осуществить при использовании следующего выражения:

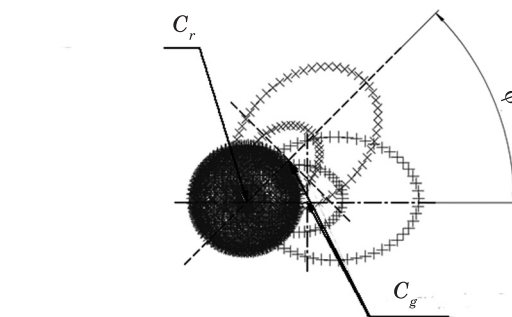
$$\begin{cases} x' - x_0 = (x - x_0)\cos\varphi - (y - y_0)\sin\varphi \\ y' - y_0 = (x - x_0)\sin\varphi + (y - y_0)\cos\varphi \end{cases},$$

где  $x_0, y_0$  – координаты центра поворота,  $\varphi$  – угол поворота ячейки.

Благодаря применению рассмотренных выше методов сокращения избыточности информации можно добиться многократного уменьшения объема памяти компьютера, требуемой для хранения таблицы соответствия. Также благодаря сокращению количества вычислений значительно сокращается время “предварительного” этапа синтеза голограммы.

### Заключение

В работе рассмотрены особенности применения систем с СГСИ по сравнению с системами с синтезированными голограммами-проекторами Френеля. Выделены основные этапы синтеза СГСИ. Показано, что ключевой задачей синтеза является вычисление комплексной амплитуды объектной волны в



**Рис. 3.** Поворот пятна рассеяния. Центр поворота не совпадает с геометрическим центром картины пятна рассеяния.  $C_r$  – центр поворота,  $C_g$  – геометрический центр пятна рассеяния,  $\varphi$  – угол поворота.

плоскости синтеза голограммы. Рассмотрены существующие методы решения этой задачи и присущие им ограничения. На основе таблиц соответствия разработан метод расчета амплитуды объектной волны при синтезе СГСИ, удовлетворяющий предъявляемым к нему требованиям по точности расчета и быстродействию.

\* \* \* \* \*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Корешев С.Н., Ратушный В.П. Основы технологии голографической субмикронной фотолитографии // Научно-техн. вестник СПбГУ ИТМО. 2005. № 23. С. 34–41.
2. Корешев С.Н., Ратушный В.П. Голограммы сфокусированного изображения в задаче высокоразрешающей проекционной голографической фотолитографии // Опт. и спектр. 2006. Т. 101. № 6. С. 1038–1042.
3. Корешев С.Н., Никаноров О.В., Иванов Ю.А., Козулин И.А. Программный комплекс для синтеза и цифрового восстановления голограмм-проекторов: влияние параметров синтеза на качество восстановленного изображения // Оптический журнал. 2010. Т. 77. № 1. С. 42–48.
4. Корешев С.Н., Никаноров О.В., Козулин И.А. Выбор параметров синтеза голограмм-проекторов для фотолитографии // Оптический журнал. 2008. Т. 75. № 9. С. 29–34.
5. Корешев С.Н., Корепин И.Н. Выбор параметров синтеза голограмм-проекторов сфокусированного изображения // Оптический журнал. 2011. Т. 78. № 9. С. 44–49.
6. Shimobaba T., Nakayama H., Masuda N., Ito T. Rapid calculation algorithm of Fresnel computer-generated-hologram using look-up table and wavefront-recording plane methods for three-dimensional display // Opt. Exp. 2010. V. 18. № 19. P. 19504–19509.
7. Lucente M.E. Interactive computation of holograms using a look-up table // Journal of Electronic Imaging. 1993. V. 2. № 1. P. 28–34.
8. Kim S., Kim E. Effective generation of digital holograms of three-dimensional objects using a novel look-up table method // Appl. Opt. 2008. V. 47. № 19. P. D55–D62.
9. Kim S., Kim E. Fast computation of hologram patterns of a 3D object using run-length encoding and novel look-up table methods // Appl. Opt. 2009. V. 48. № 6. P. 1030–1041.