

УДК 535.417, 535.317, 778.38

ВЛИЯНИЕ МЕТОДА СИНТЕЗА ГОЛОГРАММ-ПРОЕКТОРОВ ФРЕНЕЛЯ НА КАЧЕСТВО ВОССТАНОВЛЕННОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

Старовойтов С.О. (Университет ИТМО)

Научный руководитель – д.т.н., профессор Корешев С.Н.
(Университет ИТМО)

Аннотация. Приведены результаты исследования влияния метода синтеза голограмм на качество восстановленного изображения. Работа выполнена методом математического моделирования синтеза голограмм-проекторов двумерных амплитудных бинарных транспарантов, предназначенных для применения в голографической фотолитографии. Рассмотрены два наиболее подходящих для рассматриваемого случая метода синтеза голограмм: метод, основанный на принципе Гюйгенса-Френеля, и метод таблиц соответствия. С использованием численного критерия качество установлено, что модифицированный метод таблиц соответствия позволяет получать голограммы, характеризующиеся значительно более высоким качеством восстановленного изображения.

Введение. Синтезированные голограммы в настоящее время находят применение в самых разных областях, среди которых можно особо отметить фотолитографию. Там использование синтезированных голограмм представляется особенно удобным, поскольку применяемые в ней объекты имеют вид плоских бинарных амплитудных транспарантов, голограммы-проекторы которых достаточно несложно синтезировать. Кроме того, использование отражательных голограмм в этой области позволяет обойтись без дорогостоящих проекционных объективов, а отсутствие требований к наличию оптически прозрачных материалов – уменьшить рабочую длину волны и, соответственно, увеличить разрешение фотолитографических изображений.

Компьютерные технологии, используемые при синтезе голограмм, позволяют получать голограммы, имеющие свои особенности формирования изображения, по сравнению с голограммами, изготовленными с помощью непосредственной регистрации реально существующего голографического поля. Например, в таких голограммах имеются возможность увеличения глубины резкости за счет модификации формы объекта.

Основная часть. Процесс синтеза голограмм заключается в расчёте структуры голографического поля в плоскости его регистрации на основании заданных параметров. Обычно он осуществляется одним из трёх основных методов: методом интегральных преобразований, методом Гюйгенса и методом таблиц соответствия. Первый из них слабо подходит для задач фотолитографии, поэтому в рамках данной работы он рассматриваться не будет. При использовании метода синтеза голограмм, основанного на принципе Гюйгенса, каждый пиксель объекта представляется в виде точечного источника, излучающего в пределах угловой апертуры, соответствующей ширине первого максимума картины дифракции излучения на пикселе объекта. Соответственно, в процессе расчета структуры голограммы для каждого из ее пикселей производится векторное суммирование амплитуд излучения точек объекта. При этом учитывается влияние только тех точек, что расположены в пределах конуса с углом при вершине равным апертурному углу. Он отсчитывается от нормали, восстановленной из центра пикселя голограммы. Далее, добавив амплитуду опорной волны и возведя полученное значение в квадрат, можно получить распределение интенсивности в плоскости синтеза голограммы.

При использовании метода таблиц соответствия объект разбивается на некоторые типовые элементы, а объектная волна представляется в виде векторной суммы комплексных амплитуд нескольких элементарных волн. Эти амплитуды хранятся в виде массива и накладываются на плоскость синтеза по типу штампа. В самом простом случае, когда

используются штампы в виде точек, штамп представляет собой распределение комплексной амплитуды волны, порождаемой пикселем объекта в пределах конуса с углом равным апертурному. При этом в отличие от синтеза по методу Гюйгенса, угол отсчитывается от нормали, восстановленной из центра пикселя объекта, а не голограммы.

Таким образом, рассмотренные методы отличаются размером участков голограммы, несущих информацию об элементе структуры объекта. Оценим влияние этой разницы на качество восстанавливаемого изображения с помощью ряда экспериментов. В специализированном программном комплексе были синтезированы и восстановлены в виртуальном пространстве голограммы объекта «Штриховая мира», который представлял из себя три линии шириной 6 пикселей и с промежутком между ними тоже 6 пикселей. Эксперименты выполнялись при следующих параметрах схемы синтеза и восстановления голограмм: размер пикселей объекта 80×80 нм, размер пикселей голограммы 20×20 нм, рабочая длина волны - 13,5 нм, угол падения параллельного опорного пучка $14,7^\circ$, расстояние между плоскостью объекта и плоскостью регистрации голограммы - 20345 нм.

В случае использования метода Гюйгенса для синтеза голограмм, на изображении хорошо заметны краевые эффекты, значительно снижающие его качество. Численно оценить качество полученных изображений можно по количеству допустимых уровней пороговой обработки на восстановленном изображении, при котором оно по распределению интенсивности идентично исходному объекту. При использовании первого метода допустимыми являлись 94 уровня, а при использовании второго – 164.

Преимущество метода «штамповки», по сравнению с методом Гюйгенса не зависело от размера пикселя объекта и сохранялось в случае синтеза голограмм для приемников с повышенным разрешением, т.е. в случае равенства размеров пикселей объекта и голограммы. Это было показано на эксперименте с объектом типа «Уголки», представляющий из себя фотошаблон с крестиком и четырьмя уголками разной ширины. При использовании первого метода допустимыми являлись 5 уровней, а при использовании второго – 30.

Выводы. Метод таблиц соответствия позволяет получать голограммы, характеризующиеся более высоким качеством восстановленного изображения по сравнению с методом Гюйгенса. Как минимум полуторакратный выигрыш в качестве наблюдался для всех использованных типов объектов вне зависимости от размеров их пикселей и соблюдения критерия Рэлея. По существу, метод таблиц соответствия эквивалентен нереализуемому в физической голографии случаю регистрации голограммы с установленным перед объектным транспарантом «матовым» стеклом, вносящим одинаковую фазовую задержку в излучение, проходящее через каждый пиксель объектного транспаранта.

Старовойтов С.О. (автор)

Корешев С.Н. (научный руководитель)