

48. **Воспроизведение синтезированных с использованием преобразования Хартли голограмм при помощи микрозеркального модулятора и их применение в задачах оптической обработки информации**

Н. Н. Евтихийев, В. В. Краснов, Д. Ю. Молодцов, В. Г. Родин, Р. С. Стариков, П. А. Черемхин
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

Проведён компьютерный синтез амплитудных голограмм с использованием преобразования Хартли. Осуществлён вывод синтезированных бинаризованных голограмм на микрозеркальный пространственно-временной модулятор света. Выполнен сравнительный анализ голограмм, синтезированных с использованием преобразований Фурье и Хартли, по средней дифракционной эффективности по объекту и относительной ошибке восстановления изображения по интенсивности. Подтверждена применимость голограмм, синтезированных с использованием преобразования Хартли, в качестве фильтров в некогерентных оптических корреляторах.

Ключевые слова: Синтез голограмм, Преобразование Хартли, Микрозеркальный модулятор, Некогерентные корреляторы.

Цитирование: **Евтихийев, Н. П.** Воспроизведение синтезированных с использованием преобразования Хартли голограмм при помощи микрозеркального модулятора и их применение в задачах оптической обработки информации / Н. Н. Евтихийев, В. В. Краснов, Д. Ю. Молодцов, В. Г. Родин, Р. С. Стариков, П. А. Черемхин // HOLOEXPO 2020 : XVII международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2020. — С. 310–314.

Введение

В настоящее время микрозеркальные модуляторы успешно используются при решении различных задач информационной оптики, например таких как оптическое кодирование [1] или распознавание образов [2]. В отличие от жидкокристаллических пространственно-временных модуляторов света микрозеркальные модуляторы [3] осуществляют амплитудную модуляцию с помощью отражения светового потока от матрицы микрозеркал. Быстродействие таких модуляторов на два-три порядка превышает быстродействие жидкокристаллических модуляторов света, что важно при использовании микрозеркальных модуляторов в качестве устройств оперативного вывода голографических и дифракционных оптических элементов.

В оптических корреляторах успешно применяются голограммы Фурье, как зарегистрированные оптическими методами, так и синтезированные на компьютере. Но, как известно, преобразование Фурье всегда производится в комплексной плоскости, в т. ч. и для действительных функций, которыми обычно описываются распознаваемые объекты. Отличительной особенностью преобразования Хартли [4] является то, что образ действительной функции

всегда является действительным, в отличие от преобразования Фурье. Поэтому при вычислении преобразования Хартли осуществляется в два раза меньше операций, чем при вычислении преобразования Фурье, что может оказаться полезным в быстродействующих распознающих системах, в которых требуется оперативный синтез голограмм-фильтров. Так как преобразование Хартли действительно, его удобно использовать при синтезе амплитудных голограмм, а для вывода синтезированных с его помощью голограмм уместно использовать именно быстродействующие микрзеркальные модуляторы.

Таким образом, целью работы являлось исследование применимости голограмм, синтезированных с использованием преобразования Хартли, в качестве фильтров в некогерентных оптических корреляторах и проведение сравнительного анализа голограмм, синтезированных с использованием преобразований Фурье и Хартли при их выводе на микрзеркальном модуляторе.

1. Взаимосвязь преобразований Фурье и Хартли

Введение преобразования Хартли было вызвано необходимостью обработки информации, которая представляет собой последовательности вещественных данных (одномерных и двумерных). Данный вид преобразования назван в честь Р. Хартли, опубликовавшего в 1942 году статью о паре интегральных преобразований — прямом и обратном, использующих введенную им функцию.

$$\text{cas } \theta = \cos \theta + \sin \theta.$$

Прямое и обратное преобразования Хартли [3] задаются парой формул:

$$H(f) = \int_{-\infty}^{\infty} V(t) \text{cas}(2\pi ft) dt,$$

$$V(t) = \int_{-\infty}^{\infty} H(f) \text{cas}(2\pi ft) df,$$

где f — циклическая частота, а функция cas представляет собой сумму косинуса и синуса одного аргумента: $\text{cas}(2\pi ft) = \cos(2\pi ft) + \sin(2\pi ft)$.

В отличие от преобразования Фурье, отображающего вещественные функции в комплексную область и несимметричного по комплексной переменной (происходит изменение знака при переходе от прямого к обратному преобразованию) преобразование Хартли осуществляет прямое и обратное преобразования только в вещественной области и обладает указанной симметрией. Взаимосвязь преобразований Фурье и Хартли базируется на анализе свойства симметрии. Преобразование Фурье равно разности четной составляющей преобразования Хартли и нечетной составляющей, умноженной на мнимую единицу, а преобразование Хартли определяется как разность вещественной и мнимой составляющих преобразования Фурье.

В работе [5] было аналитически показано, что голограммы, синтезированные с использованием преобразования Хартли, могут применяться в некогерентных оптических корреляторах в качестве голограмм-фильтров, что может повысить быстродействие синтеза голографических фильтров для оптических корреляторов в два раза.

2. Синтез голограмм с использованием преобразования Хартли

Алгоритм синтеза голограмм для некогерентных оптических корреляторов с использованием преобразования Хартли схож с алгоритмом синтеза таких голограмм с использованием преобразования Фурье [6]. Требуемый импульсный отклик голограммы-фильтра, заданный в виде растрового изображения или числового массива, помещается на входное поле с числом отсчетов, равным числу отсчетов в синтезируемой голограмме. Эквивалентный точечный опорный источник считается помещенным в центр входного поля. Изображение требуемого импульсного отклика помещается относительно центра входного поля таким образом, чтобы обеспечить его пространственное разделение с другими дифракционными порядками при восстановлении изображения с голограммы.

В случае синтеза голограммы для некогерентного коррелятора возникает необходимость в использовании случайной фазовой маски, накладываемой на изображение импульсного отклика, для увеличения её эффективной площади и, таким образом, повышения дифракционной эффективности синтезируемой голограммы. Учитывая вещественность преобразования Хартли, в качестве возможных значений фазы возможен случайный выбор только двух значений 0 и π .

Далее находится коэффициент амплитудного пропускания синтезируемой голограммы. Так как преобразование Хартли вещественно, при синтезе голограммы Хартли, в отличие от синтеза голограммы Фурье, добавление комплексно-сопряженного образа опорного объекта не требуется. Для получения неотрицательного коэффициента амплитудного пропускания синтезируемой голограммы к формируемому образу добавляется положительное постоянное смещение, равное или превышающее максимум модуля отрицательного значения образа. Перед сохранением синтезированной голограммы в виде файла выполнялось нормирование её коэффициента амплитудного пропускания на единицу. Так как микрозеркальный модулятор осуществляет бинарную модуляцию, перед выводом синтезированные голограммы подвергаются процедуре бинаризации с использованием либо одношаговых [7], либо итеративных методов бинаризации [8].

3. Вывод синтезированных голограмм на микрозеркальный модулятор

В работе был проведен синтез голограмм с использованием преобразований Фурье и Хартли для различных изображений контурных и неконтурных объектов. Объекты имели размеры 128×128 отсчетов, которые могли принимать значения от 0 до 255, и различались как по

форме, так и по степени заполненности изображений ненулевыми отсчетами. Степень заполненности изображений ненулевыми отсчетами вычислялась как отношение средней величины значений отсчетов к максимальному значению отсчета в изображении.

Был проведен сравнительный анализ синтезированных голограмм, в качестве наиболее значимых параметров были выбраны полная дифракционная эффективность по объекту, так как она отражает использование мощности в восстановленном изображении в границах и, учитывая, что голограммы будут использоваться в некогерентных корреляторах, относительная ошибка восстановления изображения по интенсивности, рассчитанная как среднеквадратическое отклонение интенсивности восстановленного объекта от расчетного объекта. По результатам анализа получено, что основные характеристики голограмм отличаются не более чем на 6%, таким образом использование преобразования Хартли не ухудшает, а для некоторых объектов улучшает качество восстановленных изображений.

Было проведено оптическое восстановление изображений с синтезированных бинарных голограмм, синтезированных с использованием преобразований Фурье и Хартли с числом отсчетов 512×512 и 1024×1024 . Вывод голограмм осуществлялся на микрозеркальный и, для сравнения, на жидкокристаллический модуляторы света. Получено визуальное сходство качества восстановленных изображений, что подтверждает применимость голограмм, синтезированных с использованием преобразования Хартли, в качестве фильтров в некогерентных оптических корреляторах.

Заключение

В работе был проведён компьютерный синтез амплитудных голограмм с использованием преобразования Хартли, результаты экспериментов по выводу бинаризованных голограмм на микрозеркальный и жидкокристаллический модуляторы света подтверждают результаты численных экспериментов о близости качества изображений, восстанавливаемых с голограмм, синтезированных с использованием преобразований Фурье и Хартли. Учитывая, что быстродействие микрозеркальных модуляторов превышает быстродействие жидкокристаллических, а при вычислении преобразования Хартли осуществляется в два раза меньше операций, чем при вычислении преобразования Фурье, при синтезе голограмм, их совместное применение, обосновано в высокоскоростных распознающих устройствах, где требуется оперативный синтез и вывод голограмм-фильтров.

Список источников

- [1] **Евтихийев, Н. Н.** Оптическое кодирование QR-кодов в схеме с пространственно-некогерентным освещением на базе двух микрозеркальных модуляторов света / Н. Н. Евтихийев, В. В. Краснов, И. Д. Кузьмин, Д. Ю. Молодцов, В. Г. Родин, Р. С. Стариков, П. А. Черемхин // Квантовая электроника. — 2020. — Том 50. — №2. — С. 195–196.
- [2] **Molodtsov, D. Yu.** Object recognition in non-coherent optical correlator based on DMD-modulator / D. Yu. Molodtsov, V. G. Rodin // Proc. of SPIE. — 2016. — Vol. 10176. — P. 101761A.
- [3] **Hornbeck, L. J.** Bistable deformable mirror device / L. J. Hornbeck, W. E. Nelson // OSA Technical Digest Series. — 1988. — Vol. 8. — P. 107.

- [4] **Bracewell, R. N.** Aspects of the Hartley transform / R. N. Bracewell // Proc. IEEE. — 1994. — Vol. 82. — №3. — P. 381–387.
- [5] **Родин, В. Г.** Сравнение характеристик голограмм для некогерентных корреляторов, синтезированных с использованием преобразований Фурье и Хартли / В. Г. Родин, С. Н. Стариков, П. А. Черемхин, В. В. Краснов // Вестник Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ». — 2014. — Том 3. — №4. — С. 501–509.
- [6] **Molodtsov, D. Yu.** Impact of DMD-SLMs errors on reconstructed Fourier holograms quality / D. Yu. Molodtsov, P. A. Cheremkhin, V. V. Krasnov, V. G. Rodin // Journal of Physics: Conference Series. — 2016. — Vol. 737. — P. 012074.
- [7] **Otsu, N.** A threshold selection method from gray-level histograms / N. Otsu // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. — 1979. — Vol. 9. — №1. — P. 62–66.
- [8] **Wyrowski, F.** Iterative quantization of digital amplitude holograms / F. Wyrowski // Applied Optics. — 1989. — Vol. 28. — №18. — P. 3864–3869.