

## 16. Оптические системы с синтезом импульсного отклика для обработки информации в пространственно-некогерентном и некогерентном излучении

*Н. Н. Евтихийев, Д. Ю. Молодцов, В. В. Краснов, П. А. Черёмхин, В. Г. Родин*  
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

Разработаны принципы построения и функционирования оптических систем с синтезом импульсных откликов при использовании пространственных и спектральных характеристик объектов в качестве информационных параметров. Осуществлены экспериментальные реализации систем распознавания и кодирования объектов в некогерентном излучении различного спектрального состава в реальном масштабе времени.

*Ключевые слова:* Некогерентное излучение, Синтезированная голограмма, Корреляционный анализ, Спектр излучения.

*Цитирование:* **Евтихийев, Н. Н.** Оптические системы с синтезом импульсного отклика для обработки информации в пространственно-некогерентном и некогерентном излучении / Н. Н. Евтихийев, Д. Ю. Молодцов, В. В. Краснов, П. А. Черёмхин, В. Г. Родин // HOLOEXPO 2019 : XVI международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2019. — С. 91–96.

Оптические корреляторы уже давно утвердились в качестве устройств, перспективность и конкурентоспособность которых не вызывает сомнений. Особое значение их применению придаёт возможность оперативного ввода информации при помощи пространственно-временных модуляторов света. В основе функционирования корреляторов лежит принцип пространственной фильтрации, позволяющий среди вводимой информации выделять объекты с заданными характеристиками. Этот же принцип используется и при построении систем для задач оптического кодирования. В качестве фильтров могут использоваться как голограммы, так и киноформы с заранее синтезированными импульсными откликами. Задача синтеза импульсных откликов таких фильтров во-многом решена для систем, использующих когерентное монохроматическое излучение. Однако это накладывает строгие требования на процессы обработки информации из-за необходимости обеспечения точности юстировки и устранения фазовых шумов оптических элементов, создания высококачественных устройств ввода информации в установку коррелятора, что значительно ограничивает применение таких систем.

Часть этих ограничений была снята за счёт использования в корреляторах квазимонохроматического пространственно-некогерентного излучения, однако задача осуществления корреляционного анализа в реальном масштабе времени непосредственно в излучении рас-

познаваемых объектов в полной мере не была решена. В этом случае осуществлялась операция монохроматизации излучения, что приводило к необходимости введения дополнительных элементов в оптическую схему коррелятора, направленных на компенсацию возникающих хроматических эффектов и проведение дальнейших операций в квазимонохроматическом свете. При таком подходе при корреляционном анализе в качестве информационных используются только пространственные характеристики объекта.

Спектральный состав излучения объектов также является важной информационной характеристикой, и существует множество устройств его регистрации. Эти устройства дают сведения об общем составе регистрируемого излучения безотносительно места расположения источников излучения. В настоящее время имеется ряд практических задач, в которых идентификация того или иного объекта в равной степени определяется как его формой, так и спектром его излучения.

При немонохроматическом входном излучении в выходной плоскости некогерентного коррелятора будет формироваться распределение интенсивности, представляющее собой сумму откликов на каждой из спектральных компонент, присутствующих в спектре излучения объекта. При этом зависимость протяженности импульсного отклика голографического фильтра от частоты излучения приведёт к тому, что корреляционное распределение интенсивности на каждой из частот будет представлять собой корреляцию разномасштабных объектов, кроме того, центры корреляционных максимумов на каждой из частот будут пространственно локализованы в разных точках выходной плоскости

$$I(x_1, y_1) = K \iiint I_{\text{ВХ}}(x, y, \nu) I_{\text{ОП}}((x - x_1)\nu/\nu_0, (y - y_1)\nu/\nu_0) dx dy d\nu,$$

где  $I_{\text{ВХ}}(x, y)$  — распределение интенсивности по изображению входного объекта в выходной плоскости коррелятора,  $I_{\text{ОП}}(x_0, y_0)$  — импульсный отклик голографического Фурье-фильтра,  $\nu = c/\lambda$  — частоты входного излучения,  $\nu_0 = c/\lambda_0$  — частота излучения, используемая при записи (или синтезе) голографического Фурье-фильтра,  $K_1$  — постоянный коэффициент пропорциональности.

Для проведения успешной идентификации объектов, причём не только пространственным, но и по спектральным параметрам в реальном масштабе времени необходимо добиться локализации корреляционных сигналов для тех спектральных компонент входного излучения, информация о которых содержится на голографическом фильтре; кроме того, центры корреляционных сигналов для всех спектральных компонент излучения, совпадающих с компонентами опорного спектра, должны находиться в единой точке выходной плоскости.

Выполнение этих условий возможно при изготовлении голографического фильтра, импульсный отклик такого фильтра должен представлять обобщенный пространственный образ объекта, содержащий информацию, как о пространственной структуре объекта, так и о спектре излучения, исходящего от объекта. Этот образ представляет собой несколько разномасштабных копий изображения опорного объекта, при этом количество копий определяется числом компонент в опорном спектре излучения. Размеры копий объекта и их расположение относительно выбранного начала координат обратно пропорциональны отношениям

длин волн в спектре излучения опорного объекта. Комплексная амплитуда импульсного отклика фильтра задаётся следующим образом:

$$h(x, y) = \sum_{\nu'} C_{\nu'}^{1/2} \cdot t(x \cdot \nu_0/\nu' - b_x, y \cdot \nu_0/\nu' - b_y),$$

где  $t(x, y) = I_{\text{оп}}(x, y)^{1/2} \exp(i\varphi(x, y))$  — комплексная нормированная амплитуда опорного объекта,  $\varphi(x, y)$  — случайная фаза,  $\nu'$  — частота опорного спектра,  $C_{\nu'}$  — нормированная на единицу спектральная плотность излучения с частотой  $\nu'$  в спектре мощности опорного излучения,  $\nu_0$  — частота излучения при записи голографического фильтра,  $(b_x, b_y)$  — координаты в выходной плоскости коррелятора, где будет происходить формирование корреляционных максимумов на каждой из распознаваемых спектральных компонент. Такой голографический фильтр может быть записан как оптическим излучением по одной из схем записи Фурье-голограмм, так и синтезирован на компьютере. Так как при получении корреляционных сигналов используются дисперсионные свойства излучения, системы осуществляющие корреляционное распознавание по спектральным параметрам излучения получили название — дисперсионные корреляторы.

При использовании в качестве фильтра пространственных частот Фурье-голограммы с записанным на ней обобщённым пространственным образом опорного объекта результирующий корреляционный сигнал на выходе такого коррелятора является суммой корреляционных сигналов, образованных каждой из компонент излучения входного распознаваемого объекта. При совпадении одной или нескольких частот освещающего спектра с частотами опорного спектра на этих частотах будут наблюдаться корреляционные распределения интенсивности по пространственным параметрам без искажения масштаба с локализацией в координатах  $(b_x, b_y)$ :

$$I(x_1, y_1) = K_1 \sum_{\nu'} C_{\nu'} \iiint I_{\text{вх}}(x, y, \nu) I_{\text{оп}}((x - x_1)\nu/\nu' - b_x, (y - y_1)\nu/\nu' - b_y) dx dy d\nu.$$

При совпадении пространственных параметров входного и опорного объектов будет наблюдаться глобальный максимум корреляционного распределения по пространственным параметрам, интенсивность которого равна  $I_b$ . Спектр излучения в  $(b_x, b_y)$  складывается из совокупности совпадающих спектральных компонент входного и опорного спектров, что подтверждает формирование корреляционного сигнала в  $(b_x, b_y)$  также и по спектральным параметрам:

$$I(b_x, b_y) = I_b K_1 \sum_{\nu'} C_{\nu'} \int I_{\text{вх}}(\nu) I_{\text{оп}}(\nu - \nu') d\nu.$$

В зависимости от конкретной задачи возможны несколько схемотехнических реализаций дисперсионных корреляторов. В работе в виде экспериментальных установок были воплощены традиционная «4f-схема» с пропускающим голографическим фильтром, схема с отражательным толстослойным голографическим фильтром, однолинзовая схема с реализацией фильтра в виде голограмм и киноформов, а также с отображением фильтров с помощью микрорезеркального пространственно-временного модулятора света. В качестве источников излучения использовались некогерентные и немонахроматические источники с различным спектральным составом.

Изготовление фильтров с синтезированным импульсным откликом осуществлялось оптической регистрацией на Фурье-голограмму пространственного обобщенного образа объекта, содержащего информацию, как о форме объекта, так и спектре его излучения; записью нескольких Фурье-голограмм объекта в одну фоторегистрирующую среду с возможным использованием различных источников излучения; численным расчётом голограмм и киноформов на компьютере. Метод компьютерного синтеза фильтров включал следующие этапы: формирование обобщённого пространственного образа опорного объекта; расчет расположения обобщённого пространственного образа относительно координат виртуального источника опорной волны; генерация случайной фазовой маски для снижения динамического диапазона синтезируемых голограмм; расчет светового поля от объекта в плоскости голограммы; расчет пропускания синтезированной Фурье-голограммы; создание графического файла синтезированной голограммы, согласованного с параметрами устройства вывода.

Были проведены эксперименты по идентификации объектов как по спектральным параметрам при различных условиях, так и по комплексу пространственных и спектральных параметров. Получено, что при несовпадении пространственных или спектральных характеристик объектов деградация сигнала происходила не менее чем в 2 раза, при совпадении пространственных форм и частичном совпадении спектров это значение в проведенных измерениях составляло от 1,4 и более в зависимости от степени совпадения опорного и входного спектров излучения, при полном несовпадении характеристик наблюдалась деградация сигнала не менее чем в 4,4 раза.

Была проведена оценка максимального числа разрешимых элементов в опорном изображении объекта. Определяющими требованиями для этого являются следующие условия регистрации корреляционного сигнала: нулевой порядок в плоскости регистрации корреляционного сигнала, содержащий изображение распознаваемого объекта, не должен перекрывать корреляционный сигнал; высшие порядки дифракции синтезированной голограммы также не должны перекрывать корреляционный сигнал.

Получено, что максимальное количество разрешимых элементов в изображении объекта ( $\lambda_{\min}$  и  $\lambda_{\max}$  — минимальная и максимальная длины волн в опорном спектре,  $N$  — число отсчетов на расчетном поле голограммы) равно:

$$K_{\max} \leq (\lambda_{\min} / \lambda_{\max}) N/5.$$

Полученное выражение согласуется с аналогичным выражением для коррелятора с монохроматическим освещением при  $\lambda_{\max} = \lambda_{\min}$ . Была получена оценка относительного спектрального разрешения дисперсионного коррелятора из условия совмещения положения спектральных составляющих результирующего корреляционного сигнала в пределах одного пространственного отсчёта:

$$\delta\lambda/\lambda = (\lambda_{\max} / \lambda_{\min}) 2/N.M_{\lambda_{\max}}$$

Также в качестве фильтров в корреляторах были использованы такие дифракционные оптические элементы как киноформы. Так как киноформы обычно воспроизводят только распределение интенсивности изображений, записанных с псевдослучайным распределением фазы, поэтому, их целесообразно использовать, прежде всего, в оптических системах с пространственно-некогерентным освещением. В этом случае коррелятор представлял собой собственно цифровую зеркальную фотокамеру с укрепленным на ней оптическим корреляционным фильтром с опорным изображением и, при необходимости, управляющий компьютер. Фильтр с синтезированным импульсным откликом устанавливался внутри корпуса фотокамеры, между съемным объективом и откидывающимся зеркалом видоискателя. Для обеспечения обработки всего поля кадра в качестве фильтров необходимо использование именно киноформов, а не голограмм. Таким образом, вся оптическая схема коррелятора расположена внутри фотоаппарата и использует его штатный объектив. В видоискателе наблюдаются и регистрируются фотоаппаратом только сигналы взаимной корреляции изображений входной сцены и опорного изображения, записанного на синтезированном киноформе. Степень монохроматичности ( $\lambda_{cp}/\Delta\lambda$ ) пространственно-некогерентного освещения сцены должна превышать максимальное число отсчетов опорного изображения на киноформе вдоль произвольного направления.

Эта же оптическая система может быть использована и для задач оптического кодирования. Процесс кодирования при помощи оптических систем, осуществляется при прохождении излучения от кодируемого объекта через дифракционный оптический элемент, в результате чего формируется оптическая свёртка кодируемого изображения с импульсным откликом кодирующего элемента. В качестве дифракционных оптических элементов предпочтительно использовать не Фурье-голограммы, а киноформы, так как наличие у голограмм нулевого дифракционного порядка вносит демаскирующий эффект при кодировании и приводит к дополнительным потерям излучения. Декодирование изображений, кодированных оптическим способом, является классической обратной задачей и решается путём нахождения инверсного фильтра цифровыми методами.

В последнее время широко развилась технология создания микрозеркальных модуляторов, которые осуществляют амплитудную модуляцию с помощью отражения светового потока от матрицы микрозеркал, поэтому излучение не претерпевает паразитную фазовую модуляцию. Быстродействие таких модуляторов на два-три порядка превышает быстродействие жидкокристаллических пространственно-временных модуляторов света, поэтому они могут быть успешно использованы в качестве устройств оперативного вывода голографических и дифракционных оптических элементов в задачах оптического кодирования и распознавания.

На базе микрозеркального модулятора реализована однолинзовая схема оптической системы, реализующей в зависимости от назначения операции кодирования или распознавания. Возможность использования микрозеркальных модуляторов для вывода голографических фильтров в корреляторах, функционирующих в немонахроматическом излучении, свя-

зана с тем фактом, что микрозеркальный модулятор формирует изображение путём последовательного переключения микрозеркал, т. е. в нём осуществляется только амплитудная модуляция излучения. Кроме того, использование микрозеркального модулятора в данном случае даёт возможность крайне быстрой смены выводимых голографических фильтров (при использовании специального контроллера для микрозеркального модулятора — до 32 кГц), поэтому можно осуществлять операции за меньшее время, чем при использовании ЖК-ПВМС.

Таким образом, был разработан новый класс оптических систем обработки информации — дисперсионные корреляторы, позволяющих осуществлять распознавание объектов в излучении различного спектрального состава в реальном масштабе времени. Установлены условия формирования сигналов в таких корреляторах при использовании в качестве информационных параметров пространственных и спектральных характеристик объектов. Экспериментально осуществлено формирование локализованных корреляционных сигналов по пространственным и спектральным характеристикам объектов при использовании в качестве пространственных фильтров голограмм и киноформов, чем подтверждена работоспособность корреляторов при решении задач распознавания объектов. Экспериментально подтверждена принципиальная возможность использования таких корреляторов и для задач оптического кодирования.

### **Благодарность**

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ), грант № 19-19-00498.