

РАСПОЗНАВАНИЕ ОБЪЕКТОВ ПО ПРОСТРАНСТВЕННЫМ И СПЕКТРАЛЬНЫМ ПАРАМЕТРАМ В ДИСПЕРСИОННЫХ ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ КОРРЕЛЯТОРАХ

© 2012 г. В. Г. Родин, канд. физ.-мат. наук; С. Н. Стариков

Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва

E-mail: holo@pico.mephi.ru

Рассмотрена возможность корреляционного распознавания излучающих объектов в масштабе реального времени без промежуточной регистрации их изображений или спектров. Описан процесс формирования сигналов идентификации объектов по пространственным и спектральным параметрам в дисперсионных голографических корреляторах. Приведены экспериментальные результаты корреляционного распознавания излучающих объектов с применением в качестве пространственных фильтров синтезированных голограмм Фурье.

Ключевые слова: дисперсионные корреляторы, голографические фильтры.

Коды OCIS: 100.4550, 260.2030

Поступила в редакцию 14.11.2011

Оптические корреляторы составляют один из наиболее используемых классов устройств оптической обработки информации. Их ранними представителями были системы, работающие на принципах геометрической оптики и, как правило, позволяющие обрабатывать униполярные сигналы и изображения. Появление дифракционных корреляторов, базирующихся на основополагающих голографических схемах Ван дер Люгта [1] и Ломанна [2], позволило существенно расширить функциональные и технические возможности корреляционных преобразователей. Однако круг решаемых ими задач обычно ограничен обработкой бинарных или полутоновых изображений, формируемых в монохроматическом свете. При немонохроматическом излучении в пространственно-некогерентных корреляторах возможно распознавание объектов только по пространственным параметрам после монохроматизации излучения (фильтры, дифракционные решетки [3], отражательные толсто-слойные голограммы [4]).

Новые возможности оптических корреляторов связаны с разработкой устройств, допускающих реальный временной масштаб обработки параметров излучающих или рассеивающих объектов. Поэтому в таких корреляторах, которые можно называть дисперсионными [5], происходит распознавание именно объектов, а не их изображений, и, помимо простран-

ственных параметров объектов, информативным также является спектральный состав излучения, испускаемого или рассеиваемого объектом. В дисперсионных корреляторах световые корреляционные сигналы распознавания формируются собственно излучением анализируемого объекта при его взаимодействии с пространственным фильтром-памятью. При распознавании объектов в качестве фильтров можно использовать как пространственные транспаранты [6], так и голограммы Фурье [7].

Рассмотрим процесс формирования сигналов распознавания объектов по пространственным и спектральным параметрам в дисперсионных корреляторах, использующих голографические фильтры Фурье. На рис. 1а представлена схема спектроанализатора с дифракционной решеткой в качестве дисперсионного элемента. Для примера, в качестве входного спектра использован спектр ртутной лампы, состоящий из трех основных компонент. Изображения входной щели, сформированные каждой компонентой входного спектра, пространственно разнесены в выходной плоскости спектроанализатора. В этой схеме спектроанализатора в качестве дифракционной решетки можно использовать голограмму, причем записать ее таким образом, чтобы она содержала три решетки. При этом можно добиться формирования изображения входной щели каждой компонентой в одной, заранее определенной

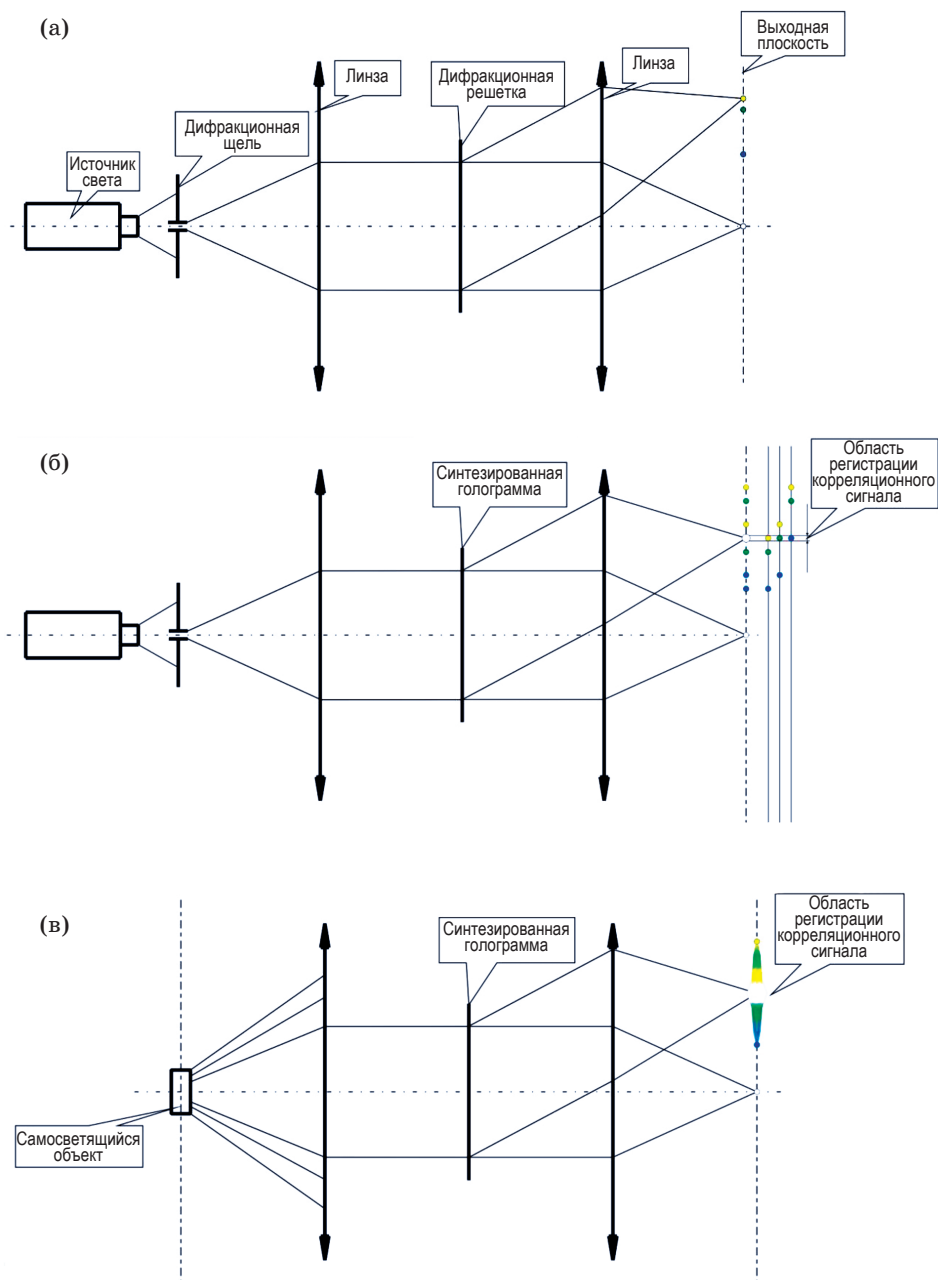


Рис. 1. Принципиальные схемы спектроанализатора (а), дисперсионного коррелятора для распознавания спектров (б), дисперсионного коррелятора для распознавания объектов по их пространственным и спектральным параметрам (в).

точке выходной плоскости (рис. 1б). Тогда интенсивность в этой точке будет представлять собой сумму интенсивностей от каждой из компонент спектра, а спектр излучения в этой точке будет складываться из компонент спектра входного излучения. Регистрируемый сигнал можно трактовать как сигнал распознавания входного излучения по его спектральным параметрам.

Приведенная на рис. 1в схема является также известной схемой голографического корреля-

лятора с монохроматическим пространственно-некогерентным освещением [2], в котором осуществляется распознавание объектов по их пространственным параметрам. В выходной плоскости такого коррелятора будет формироваться распределение интенсивности

$$I(x_1, y_1) = K \int I_{\text{BX}}(x, y) I_{\text{ОП}}(x - x_1, y - y_1) dx dy, \quad (1)$$

где $I_{\text{BX}}(x, y)$ – распределение интенсивности по изображению входного объекта в вы-

ходной плоскости коррелятора, $I_{\text{ОП}}(x_0, y_0)$ – импульсный отклик голографического фильтра Фурье, пропорциональный нормированному на единицу распределению интенсивности по изображению опорного объекта, K – постоянный коэффициент пропорциональности.

При немонохроматическом входном излучении в выходной плоскости такого коррелятора будет формироваться распределение интенсивности, представляющее собой сумму откликов на каждой из спектральных компонент, присутствующих в спектре излучения объекта. Зависимость протяженности импульсного отклика голографического фильтра от частоты излучения приведет 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.

$$I(x_1, y_1) = K_1 \iiint I_{\text{ВХ}}(x, y, \nu) I_{\text{ОП}}[(x - x_1)\nu/\nu_0, (y - y_1)\nu/\nu_0] dx dy d\nu, \quad (2)$$

где $\nu = c/\lambda$ – частоты входного излучения, $\nu_0 = c/\lambda_0$ – частота излучения при записи голографического фильтра Фурье, $K_1 = K/\nu_0$ – постоянный коэффициент пропорциональности.

Для решения задачи распознавания излучающих или рассеивающих объектов по совокупности их пространственных и спектральных параметров возникает необходимость в изготовлении голографического фильтра. Его импульсный отклик должен представлять обобщенный пространственный образ объекта, содержащий информацию как о пространственной структуре объекта, так и о спектре его излучения. Комплексная амплитуда импульсного отклика имеет вид

$$h(x, y) = \sum_{\nu} C_{\nu}^{1/2} t[x(\nu_0/\nu') - b_x, y(\nu_0/\nu') - b_y], \quad (3)$$

где $t(x, y) = I_{\text{ОП}}(x, y)^{1/2} \exp(i\varphi(x, y))$ – комплексная нормированная амплитуда опорного объек-

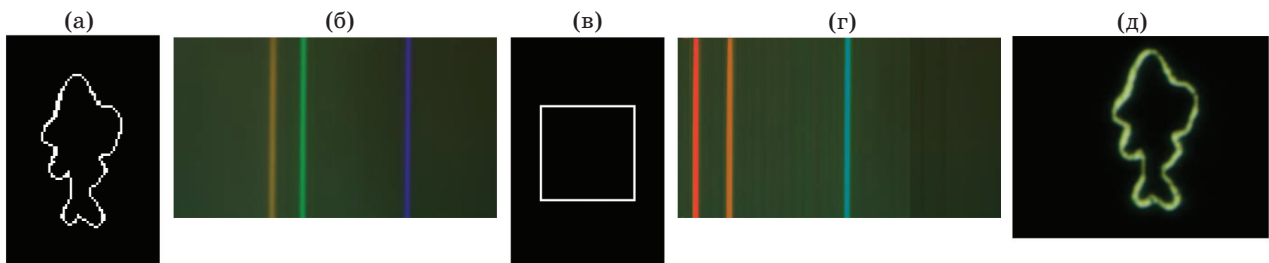


Рис. 2. Изображения опорного объекта (а), опорного спектра (б), одного из распознаваемых объектов (в), одного из распознаваемых спектров (г), входного объекта, наблюдаемое в первом порядке дифракции (д).

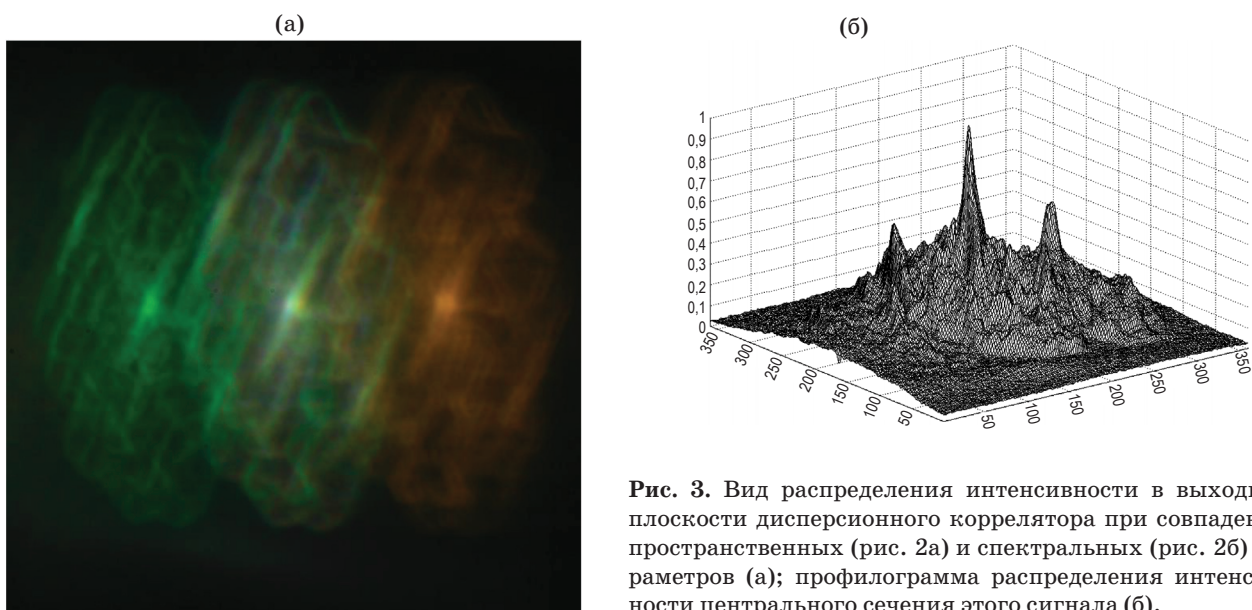


Рис. 3. Вид распределения интенсивности в выходной плоскости дисперсионного коррелятора при совпадении пространственных (рис. 2а) и спектральных (рис. 2б) параметров (а); профилограмма распределения интенсивности центрального сечения этого сигнала (б).

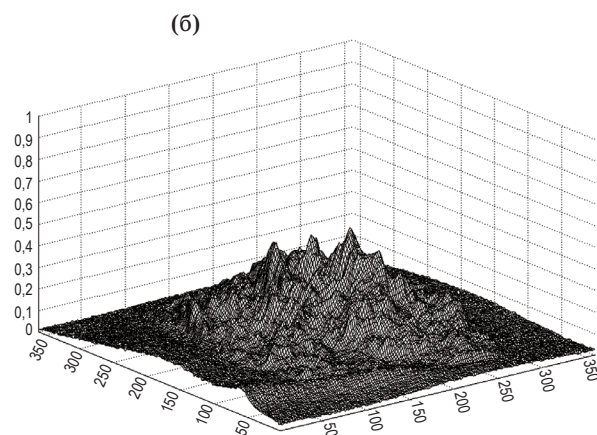
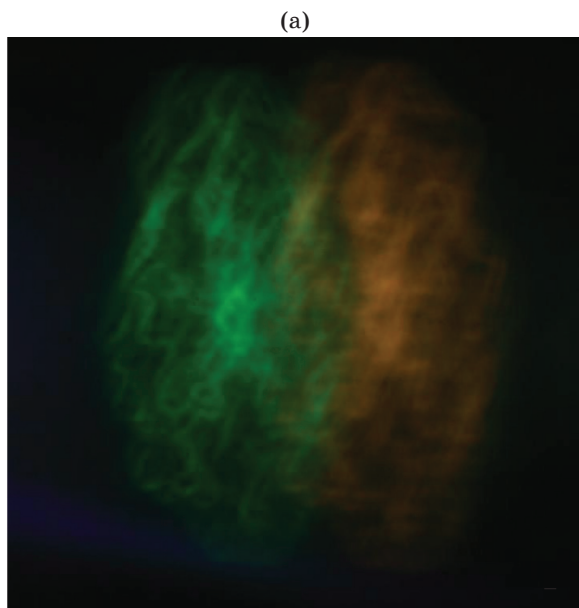


Рис. 4. Вид распределения интенсивности в выходной плоскости дисперсионного коррелятора при совпадении пространственных (рис. 2а) и несовпадении спектральных (рис. 2б, г) параметров (а); профилограмма распределения интенсивности центрального сечения этого сигнала (б).

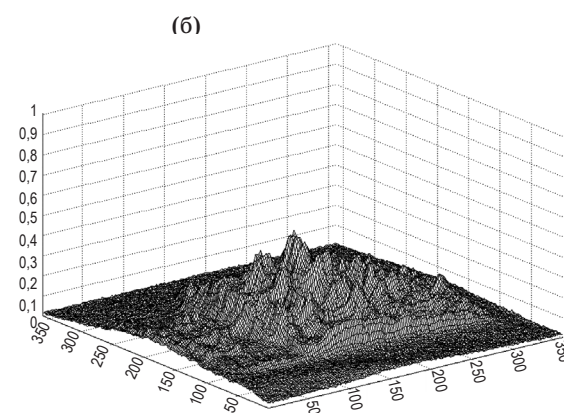
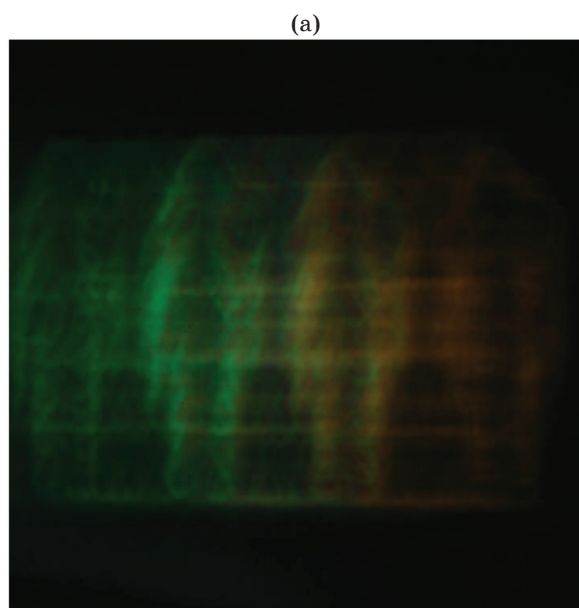


Рис. 5. Вид распределения интенсивности в выходной плоскости дисперсионного коррелятора при несовпадении пространственных (рис. 2а, в) и совпадении спектральных (рис. 2б) параметров (а); профилограмма распределения интенсивности центрального сечения этого сигнала (б).

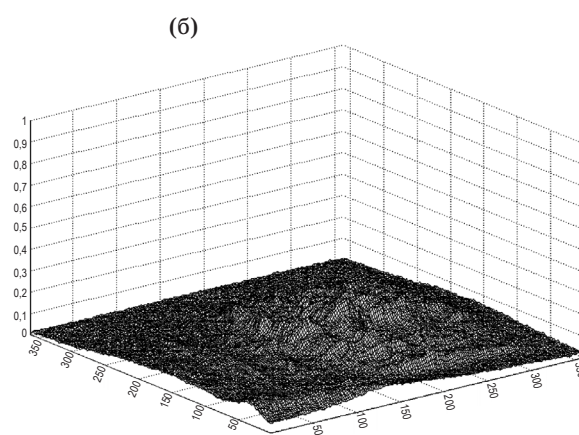
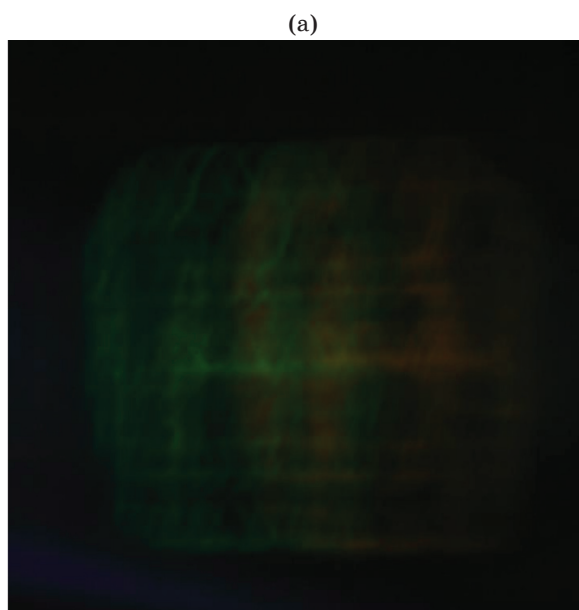


Рис. 6. Вид распределения интенсивности в выходной плоскости дисперсионного коррелятора при несовпадении как пространственных (рис. 2а, в), так и спектральных (рис. 2б, г) параметров (а); профилограмма распределения интенсивности центрального сечения этого сигнала (б).

та, $\varphi(x, y)$ – случайная фаза, ν' – частота опорного спектра, $C_{\nu'}$ – нормированная на единицу спектральная плотность излучения с частотой ν' в спектре мощности опорного излучения, ν_0 – частота излучения при записи голографического фильтра, (b_x, b_y) – координаты точки 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 голограмм Фурье, так и синтезирован на компьютере [8].

Принципиальная схема дисперсионного коррелятора показана на рис. 1в. При использовании голографического фильтра, записанного согласно выражению (3), суммарная интенсивность распределения интенсивности на всех спектральных частотах входного излучения в выходной плоскости коррелятора будет равна

$$I(x_1, y_1) = K_1 \Sigma_{\nu} C_{\nu} \iint I_{\text{ВХ}}(x, y, \nu) I_{\text{ОП}}[(x - x_1)\nu/\nu' - b_x, (y - y_1)\nu/\nu' - b_y] dx dy d\nu. \quad (4)$$

При совпадении одной или нескольких частот освещающего спектра с частотами опорного спектра на них будут наблюдаться корреляционные распределения интенсивности по пространственным параметрам без искажения масштаба с центром в точке (b_x, b_y) .

$$I(x_1, y_1) = K_1 \Sigma_{\nu} C_{\nu} \iint I_{\text{ВХ}}(x, y, \nu') I_{\text{ОП}}(x - x_1 - b_x, y - y_1 - b_y) dx dy. \quad (5)$$

При смещении входного объекта на величину $(\Delta x; \Delta y)$ центр выходного сигнала распознавания на каждой спектральной частоте будет смещен на $\Delta x \nu/\nu'$ и $\Delta y \nu/\nu'$ соответственно, однако сигнал, формируемый при совпадении спектральных параметров, сместится также на величину $(\Delta x; \Delta y)$.

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 этой точке складывается из совокупности совпадающих спектральных компонент входного и опорного спектров. Таким образом, в точке с координатами (b_x, b_y) будет наблюдаться корреляция также и по спектральным параметрам

$$I(b_x, b_y) = I_b K_1 \Sigma_{\nu} C_{\nu} \int I_{\text{ВХ}}(\nu) I_{\text{ОП}}(\nu - \nu') d\nu. \quad (6)$$

Таким образом, в данном участке выходной плоскости локализованы глобальные максимумы корреляционных распределений как по пространственным, так и по спектральным параметрам.

Далее будут представлены экспериментальные результаты, подтверждающие полученные соотношения, на примере распознавания излучающего объекта с однородным линейчатым спектром. В качестве фильтров пространственных частот были использованы рассчитанные согласно выражению (3) бинарные голограммы Фурье (2048×2048 отсчетов), изготовленные на лазерном фотовыводящем устройстве *Heidelberg Hercules Pro* с разрешением 2540 точек/дюйм.

В качестве входных объектов использовались пространственные транспаранты, изготовленные на прозрачной пленке, освещаемые различными источниками излучения. Вид пространственной формы опорного объекта приведен на рис. 2а, изображение опорного спектра – спектра излучения ртутной лампы с линиями 578, 546 и 436 нм, приведено на рис. 2б. Для оценки качества распознавания использовались объекты с другими пространственными и спектральными параметрами, например, показанными на рис. 2в, г. Сигналы распознавания фиксировались цифровой фотокамерой. На рис. 2д представлено изображение входного объекта, наблюдаемое в первом порядке дифракции.

На рис. 3а приведен вид распределения интенсивности в выходной плоскости дисперсионного коррелятора при совпадении пространственных (рис. 2а) и спектральных (рис. 2б) параметров, наблюдаемого в первом порядке дифракции. В центре распределения виден глобальный максимум автокорреляции по пространственным параметрам, усиленный автокорреляцией по спектру, являющийся сигналом распознавания коррелятора. Также присутствуют боковые максимумы из-за кросс-корреляции по спектральным параметрам. Цвет центрального максимума складывается из суммы трех спектральных компонент, боковые максимумы окрашены в цвета компонент ртутной лампы. На рис. 3б изображена профилограмма центрального сечения распределения интенсивности в выходной плоскости. Как видно, значение интенсивности центрального максимума превышает ин-

тенсивность боковых максимумов более чем в 2 раза.

На рис. 4а приведен вид распределения интенсивности в выходной плоскости дисперсионного коррелятора при совпадении пространственных (рис. 2а) и несовпадении спектральных (рис. 2б, г) параметров. На рис. 4б изображена профилограмма центрального сечения распределения интенсивности в выходной плоскости. Как видно, значение интенсивности центрального максимума уменьшилось по сравнению с таковым на рис. 3б приблизительно в 2,2 раза.

На рис. 5а приведен вид распределения интенсивности в выходной плоскости дисперсионного коррелятора при несовпадении пространственных (рис. 2а, в) и совпадении спектральных (рис. 2б) параметров. На рис. 5б изображена профилограмма центрального сечения распределения интенсивности в выходной плоскости. Как видно, значение интенсивности центрального максимума уменьшилось по сравнению с таковым на рис. 3б приблизительно в 2,3 раза.

На рис. 6а приведен вид распределения интенсивности в выходной плоскости дисперсионного коррелятора при несовпадении как пространственных (рис. 2а, в), так и спектральных (рис. 2б, г) параметров. На рис. 6б изображена

профилограмма центрального сечения распределения интенсивности в выходной плоскости. Как видно, значение интенсивности центрального максимума уменьшилось по сравнению с таковым на рис. 3б приблизительно в 4,5 раза.

Заключение

В работе рассмотрен процесс корреляционного распознавания излучающих объектов в масштабе реального времени без промежуточной регистрации их изображений или спектров. Получены математические соотношения, описывающие процесс формирования сигналов идентификации объектов как по спектральным, так и по совокупности пространственных и спектральных параметров в дисперсионных голографических корреляторах.

Проведены эксперименты по корреляционному распознаванию тестовых излучающих объектов с применением в качестве пространственных фильтров синтезированных голограмм Фурье. Полученные результаты идентификации объектов по их пространственным и спектральным параметрам подтверждают работоспособность дисперсионных корреляторов с синтезированными голограммами для задач распознавания излучающих объектов в масштабе реального времени.

* * * * *

ЛИТЕРАТУРА

1. Van der Lugt A. Signal detection by complex spatial filtering // IEEE Trans. Inform. Theory. 1964. V. IT-10. № 2. P. 139–145.
2. Lohmann A.W. Matched filtering with selfluminous objects // Appl. Opt. 1968. V. 7. № 3. P. 561–563.
3. Быковский Ю.А., Ларкин А.И., Маркилов А.А., Миронов Ю.А., Стариков С.Н. Голографическое устройство для распознавания образов // А.С. № 862713. Бюл. изобр. 1983. № 38. С. 224.
4. Bykovsky Yu.A., Markilov A.A., Rodin V.G., Smazheliuk M.F., Starikov S.N. Non-coherent correlator with reflective volume holographic filter // Proc. SPIE. 1996. V. 2969. P. 454–458.
5. Быковский Ю.А., Маркилов А.А., Родин В.Г., Стариков С.Н. Дисперсионные корреляторы в системах оптической обработки информации // Инженерная физика. 1999. № 1. С. 32–35.
6. Быковский Ю.А., Иванова С.Д., Маркилов А.А., Смажельюк М.Ф., Стариков С.Н. Коррелятор сигналов со спектральным кодированием // Тез. докл. II Всесоюз. конф. по оптической обработке информации. Фрунзе, 1990. С. 95.
7. Bykovsky Yu.A., Lyubchenko A.V., Markilov A.A., Rodin V.G., Starikov S.N. Light Spectrum and Image Structure Correlator // Proc. SPIE. 1993. V. 2051. P. 969–973.
8. Родин В.Г., Стариков С.Н. Дисперсионный коррелятор с синтезированной голограммой // Тез. докл. V Межд. форума “Голография. ЭКСПО-2008”. Санкт-Петербург, 2008. С. 225–226.