

С. Б. Одиноков, А. Ю. Павлов

## АНАЛИЗ ОПТИЧЕСКИХ СХЕМ СТЕНДА ПОЛУЧЕНИЯ СПЕЦИАЛЬНОГО ГОЛОГРАФИЧЕСКОГО ЗАЩИТНОГО ЭЛЕМЕНТА И УСТРОЙСТВА КОНТРОЛЯ ПОДЛИННОСТИ ЗАЩИТНЫХ ГОЛОГРАММ

*Проведены анализ и исследование схем оптико-электронных корреляторов для реализации системы идентификации документов с защитными голограммами со специальными элементами. Приведены результаты математического моделирования этапов получения специального защитного элемента и контроля его подлинности. Предложены варианты модернизации исследованных оптических схем для улучшения защиты от несанкционированного доступа к скрытой внутрисистемной информации.*

**Ключевые слова:** система идентификации, защитные голограммы, фурье-преобразование, оптическое векторно-матричное умножение.

В наше время серьезной и острой проблемой для производителей и потребителей является защита товаров от подделки. Подделки носят массовый характер в таких областях промышленности, как производство медицинских препаратов, сигарет и спиртных напитков, парфюмерии и косметики, выпуск аудио- и видеопродукции и программного обеспечения. Кроме того, из-за массового внедрения в бытовую сферу кредитных карт, смарт-карт для оплаты услуг связи, пропускных документов и удостоверений на основе бесконтактных пластиковых карт взгляд фальсификаторов обращен и на эти массовые предметы повседневного использования.

Одним из общепринятых средств решения этой проблемы является маркирование материальных объектов специальными защитными знаками (СЗЗ), обладающими набором защитных свойств. Решение об аутентичности материального объекта в этом случае принимается в зависимости от степени соответствия исследуемого СЗЗ эталонному. Знаки признаются идентичными, если в результате анализа идентифицируются все предусмотренные для данного СЗЗ защитные свойства.

В последние годы широкое применение находят защитные знаки, основанные на рельефных голограммах, имеющие уникальные свойства, присущие такому способу записи данных. Объемы выпуска таких знаков (защитных голограмм) непрерывно растут. Большинство современных защитных голограмм имеют специальные защитные элементы, идентифицируемые методами визуального контроля и инструментальной идентификации с помощью универсальных приборных средств. В любом случае анализ защитных элементов осуществляется человеком-контролером только визуально. Поэтому окончательное

решение о подлинности сильно зависит от таких субъективных факторов, как условия наблюдения, способность наблюдателя к восприятию и интерпретации полученной информации. Автоматизация процесса идентификации защитных элементов позволяет не только избавиться от влияния указанных субъективных факторов, но и повысить степень защиты голограмм от подделки. Серьезным препятствием на пути широкого использования голограмм является тот факт, что немногочисленные существующие в настоящее время приборы такого класса из-за специфики оптических схем представляют собой сложные, крупногабаритные и дорогие лабораторные установки, которые могут применяться только на экспертном уровне.

Целью настоящей статьи является разработка метода и аппаратуры, предназначенных для автоматической идентификации рельефных голограмм со специальными защитными элементами.

Анализ оптических методов и оптико-электронных устройств, предназначенных для идентификации свойств защитных голограмм, показал, что самые эффективные автоматизированные подходы контроля подлинности — методы оптико-электронного корреляционного анализа [1, 2]. В то же время они имеют множество недостатков, которые являются неотъемлемой частью аналоговых оптических методов обработки информации. Поэтому было предложено объединить технику оптико-электронного корреляционного анализа с алгоритмами цифрового умножения оптических сигналов, использующих аналоговую свертку (ЦУАС) [3].

Был разработан метод автоматической идентификации специальных защитных элементов голограмм, основанный на применении оптического коррелятора с цифровым векторно-матричным умножением сигналов через аналоговую свертку.

**Представление операции умножения оптических сигналов как их свертки.** В системе идентификации предлагается использовать вариант реализации алгоритма ЦУАС посредством свертки оптических сигналов в области пространственных частот. Применение его основных положений к оптическим сигналам рассмотрим подробнее.

Как известно, свертка двух функций  $f_1(\xi)$  и  $f_2(\xi)$  может быть представлена как обратное преобразование Фурье произведения фурье-образов этих функций, т.е.

$$f_1(\xi) \otimes f_2(\xi) = F^{-1} \{ F \{ f_1(\xi) \} \cdot F \{ f_2(\xi) \} \}, \quad (1)$$

следовательно, выполнение свертки может происходить в фурье-плоскости объектива. Здесь и далее символ  $\otimes$  обозначает интегральную операцию свертки, а  $F \{ \}$  и  $F^{-1} \{ \}$  — операторы прямого и обратного преобразований Фурье.

Например, рассмотрим случай умножения  $5 \times 7 = 35$ , что в двоичной записи чисел выглядит как  $101 \times 111 = 100011$  (результат произведения в смешанном формате [3] имеет вид 11211). Входные оптические сигналы могут быть представлены в виде суммы  $\delta$ -функций (двоичные единицы), разнесенных между собой на расстояния  $a^*n$ , где  $a$  — шаг между разрядами,  $n$  — номер разряда. Таким образом, входные сигналы имеют вид

$$101 \rightarrow \delta(X) + \delta(X - 2a) \xrightarrow{F\{\}} 1 + \exp(-i \cdot 2\pi\nu \cdot 2a);$$

$$111 \rightarrow \delta(X) + \delta(X - a) + \delta(X - 2a) \xrightarrow{F\{\}} 1 + \exp(-i \cdot 2\pi\nu a) + \\ + \exp(-i \cdot 2\pi\nu \cdot 2a),$$

где  $\nu$  — пространственная частота, равная  $X/(\lambda f)$  для линзы с фокусным расстоянием  $f$  и рабочей длиной волны света  $\lambda$ .

В результате перемножения двух выражений получаем

$$1 + e(-i \cdot 2\pi\nu(a)) + 2 \exp(-i \cdot 2\pi\nu(2a)) + \\ + \exp(-i \cdot 2\pi\nu(3a)) + \exp(-i \cdot 2\pi\nu(4a)).$$

Проводя обратное преобразование Фурье, имеем

$$\xrightarrow{F^{-1}\{\}} \delta(X) + \delta(X - a) + 2\delta(X - 2a) + \delta(X - 3a) + \delta(X - 4a).$$

Полученный результат соответствует выходной функции 11211, что и следовало ожидать.

Линза выполняет только прямое преобразование Фурье; поскольку  $F\{F\{f_1(\xi)\} \cdot F\{f_2(\xi)\}\} = f_1(-\xi) \otimes f_2(-\xi)$ , то

$$f_1(\xi) \otimes f_2(\xi) = F\{F\{f_1(-\xi)\} \cdot F\{f_2(-\xi)\}\}. \quad (2)$$

Интерпретируя оптические изображения в виде матриц из нулей и единиц как вектор из чисел в двоичном формате, рассмотренную пространственно-частотную свертку можно применить для операции цифрового векторно-матричного умножения оптических сигналов.

**Анализ преобразования оптических сигналов в оптико-электронных системах индивидуализации защитных свойств голограмм.** В общем случае для осуществления идентификации защитных свойств голограммы необходимо, чтобы она несла в себе заданную кодовую информацию. Эту информацию нужно декодировать, а затем сравнить с эталонной и зарегистрировать результат сравнения. В разрабатываемой системе было принято решение считать за эталонный сигнал предсказанный результат векторно-матричного умножения двух ключей: вектора (матрицы), выбираемого из базы, и вектора, восстановленного с голограммы. Алгоритм цифрового векторного умножения

выполняется оптической схемой устройства идентификации, а сравнение — с помощью электронного блока системы. Таким образом, основное влияние на результат идентификации защитных свойств оказывает процесс преобразования оптического сигнала элементами прибора идентификации.

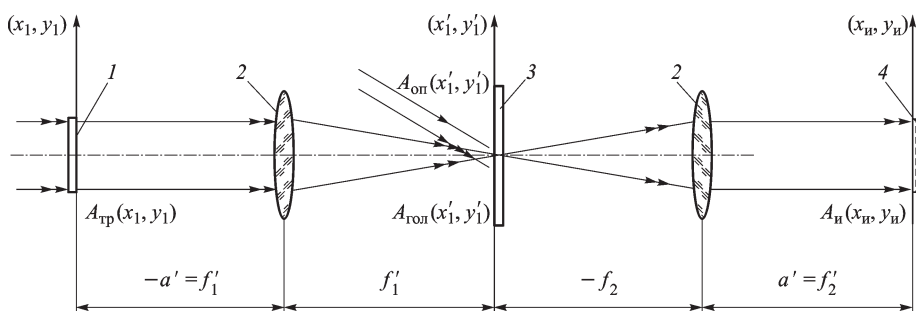
*Анализ преобразования оптических сигналов при кодировании и декодировании голографической информации.*

Идентификация защитных свойств голограммы начинается с момента декодирования информации при восстановлении волнового фронта с голограммы. Однако параметры последней определяются оптической схемой, которая использовалась для получения этой голограммы. Следовательно, в процессе анализа необходимо рассматривать прохождение оптического сигнала последовательно через схему регистрации голограммы (кодирование) и схему воспроизведения (декодирование), объединив их в один канал передачи оптической информации.

*Анализ схем устройств для получения и идентификации голограмм со специальными защитными элементами.*

Как было указано ранее, для осуществления идеи использования в системе идентификации защитных голограмм алгоритма ЦУАС с пространственно-частотной сверткой оптических сигналов защитным элементом голограммы должна быть встроенная область, содержащая голограмму фурье-вектора из двоичных чисел. Рассмотрим схему записи и восстановления голографического интерференционного поля, образованного объектной и опорной волнами, в дальнейшем — запись и восстановление голограммы. Для получения голограммы Фурье амплитуда объектной волны должна быть пропорциональна спектру Фурье объекта (транспаранта).

Традиционная схема получения и восстановления фурье-голограмм приведена на рис. 1. Данная схема единственная, позволяющая полу-



**Рис. 1. Схема получения фурье-голограмм и воспроизведения изображения транспаранта:**

1 — транспарант; 2 — фурье-преобразующие объективы; 3 — носитель записи; 4 — действительное изображение транспаранта в выходной плоскости схемы

чить плоскость, в которой объектная волна была бы пропорциональна пространственному спектру объекта без фазовых искажений [4]. В данной схеме первый фурье-преобразующий объектив формирует в плоскости записи пространственно-частотный спектр функции пропускания транспаранта, подсвеченного нормально падающей волной, т.е. комплексная амплитуда объектной волны без учета постоянных фазовых набегов и ослаблений равна

$$A_{\text{гол}}(x'_1, y'_1) = \tilde{A}_{\text{тр}}(\nu_x, \nu_y) = \tilde{A}_{\text{тр}}\left(\frac{x'_1}{\lambda f'_1}, \frac{y'_1}{\lambda f'_1}\right) = F_{x_1, y_1} \{A_{\text{тр}}(x_1, y_1)\}, \quad (3)$$

где  $\nu_x = \frac{x'}{\lambda f'_1}$  и  $\nu_y = \frac{y'}{\lambda f'_1}$  — пространственные частоты;  $\lambda$  — длина волны излучения, используемого при записи голограммы;  $f'_1$  — фокусное расстояние фурье-преобразующего объектива;  $A_{\text{тр}}(x_1, y_1) \equiv f_1(-x_1, -y_1)$  — функция пространственного распределения коэффициента пропускания жидкокристаллического пространственно-временного модулятора света (ПВМС ЖК), соответствующая первой входной функции  $f_1(\xi)$  алгоритма ЦУАС (1), например изображенной на рис. 2, а.

Согласно уравнению (2), распределение коэффициента пропускания ПВМС ЖК соответствует повернутому на  $180^\circ$  относительно начала координат или центрального элемента матрицы (при бинарной записи чисел) входному вектору-столбцу (рис. 2, б).

Если волна  $A_{\text{гол}}(x'_1, y'_1)$  записывается на голограмму-носитель и затем восстанавливается волной, идентичной используемой при записи опорной волне, то восстановленная волна описывается той же функцией  $A_{\text{гол}}(x'_1, y'_1)$ . Второй объектив осуществляет повторное преобразование Фурье, в результате чего комплексная амплитуда излучения в выходной плоскости схемы равна:

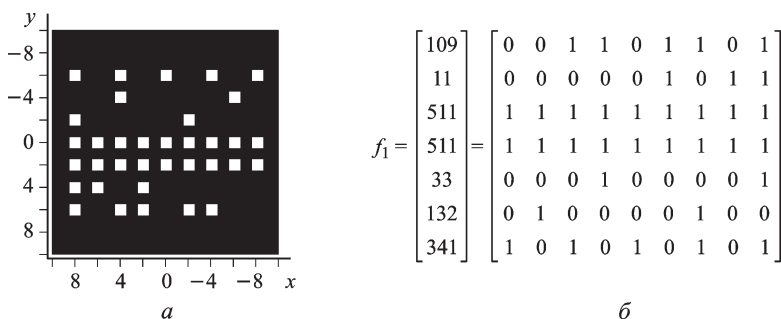


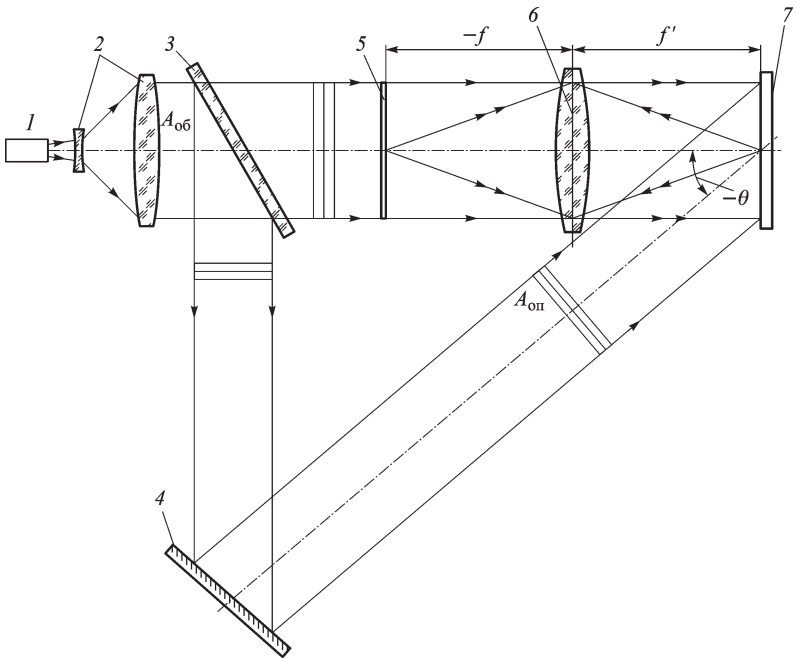
Рис. 2. Пример распределения коэффициента пропускания ПВМС ЖК, соответствующий входной функции, т.е. вектору-столбцу  $f_1$  (а), и соответствующий вектор-столбец с числами в десятичной и бинарной системах (б)

$$A_{\text{и}}(x_{\text{и}}, y_{\text{и}}) = F_{x_1, y_1} \{A_{\text{гол}}(x'_1, y'_1)\} = \\ = F_{x'_1, y'_1} \{F_{x_1, y_1} \{A_{\text{гол}}(x'_1, y'_1)\}\} = A_{\text{тр}} \left( -\frac{x_{\text{и}}}{|\beta|}, -\frac{y_{\text{и}}}{|\beta|} \right).$$

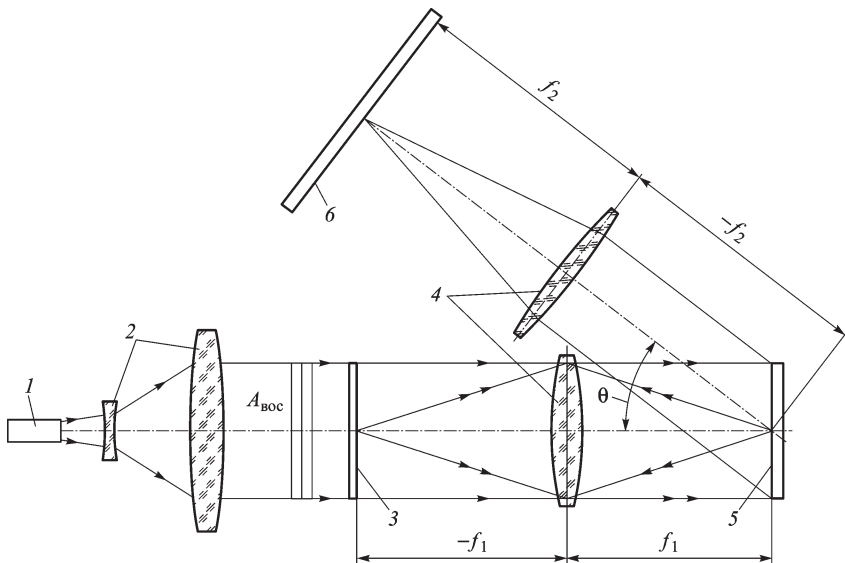
Таким образом, на выходе схемы формируется изображение транспаранта, повернутое на  $180^\circ$  вокруг оптической оси системы и масштабированное.

*Анализ оптических схем устройств идентификации голограмм с защитными элементами и их идентификации.*

В разрабатываемой системе идентификации для устройства получения защитного элемента может быть использована левая часть рассмотренной схемы (рис. 3). При записи на амплитудный ПВМС ЖК 5 будет выведено изображение, соответствующее входной функции  $f_1(\xi, \eta)$  (см. формулу (1)). Волна подсвета от лазера 1, пройдя коллимирующую систему 2, приобретает плоский волновой фронт  $A_{\text{об}}$  и освещает по нормали ПВМС ЖК 5. Фурье-преобразующий объектив 6 создает в своей задней фокальной плоскости волну, распределение комплексной амплитуды в которой будет пропорционально фурье-спектру такого изображения. На регистрирующей среде 7 будет записана голограмма Фурье с помощью опорной волны  $A_{\text{оп}}$ , получен-



**Рис. 3. Схема устройства получения защитного элемента голограммы:**  
 1 – лазер; 2 – коллимирующая система; 3 – полупрозрачное зеркало; 4 – зеркало;  
 5 – ПВМС ЖК; 6 – фурье-преобразующий объектив; 7 – регистрирующая среда



**Рис. 4. Схема устройства идентификации защитного элемента голограммы:**  
 1 — лазер; 2 — коллимирующая система; 3 — ПВМС ЖК; 4 — фурие-преобразующие объективы; 5 — рельефная голограмма с зеркальным покрытием; 6 — матричный ПЗС-фотоприемник

ной из  $A_{об}$  с помощью полупрозрачного зеркала 3 и направленной под углом минус  $\theta$  на регистрирующую среду 7.

Оптическая схема прибора идентификации защитного элемента должна будет полностью повторить традиционную (см. рис. 1) с учетом специфики схемы восстановления изображения с голограммы с зеркальным покрытием.

Возможная оптическая схема устройства идентификации приведена на рис. 4.

Лазер 1 с коллимирующей системой 2 создает плоскую восстанавливающую волну, которая освещает по нормали ПВМС ЖК 3. На ПВМС ЖК поочередно выводятся векторы-столбцы бинарных чисел, образующих функцию  $f_2(\xi, \eta)$  (см формулу (1)). Первый фурие-преобразующий объектив создает в плоскости голограммы волну с распределением комплексной амплитуды, пропорциональной спектру изображения с ПВМС ЖК. Волна, восстановленная с голограммы 5, в +1 порядок дифракции (направление распространения определяется углом  $\theta$ ), отражаясь от зеркального слоя голограммы, попадает во второй фурие-преобразующий объектив. Он, в свою очередь, строит в своей задней фокальной плоскости, совпадающей с чувствительной плоскостью матричного ПЗС-фотоприемника, изображение, интенсивность которого пропорциональна квадрату свертки функций  $f_1(\xi, \eta)$  и  $f_2(\xi, \eta)$ , что и требуется для реализации алгоритма ЦУАС.

Схема получения защитного элемента в виде голограммы Фурие (см. рис. 3), являясь достаточно компактной, что удобно для создания

рабочего устройства, приводит к сильному увеличению габаритных размеров устройства идентификации по следующим причинам:

— выставления основных элементов схемы через промежутки, равные фокусным расстояниям фурье-преобразующих объективов;

— оптическая схема устройства идентификации в целом представляет проекционную систему, линейное увеличение  $\beta$  которой по модулю должно быть больше единицы. Размеры элемента изображения на ПВМС ЖК выбираются минимальными, что расширяет пространственно частотный спектр изображения для обеспечения достаточно широкой зоны (см. формулу (3)) регистрации голограммы Фурье при разумном фокусном расстоянии первого фурье-преобразующего объектива ( $f'_1 < 150$  мм). В то же время размеры минимального элемента изображения в плоскости ПЗС-фотоприемника должны быть максимально большими для устранения шумов дискретизации. Таким образом, фокусное расстояние  $f'_2$  второго объектива в  $\beta$  раз превышает фокусное расстояние  $f'_1$  первого объектива ( $f'_2 = -\beta f'_1$ ).

Из сказанного следует, что схема устройства идентификации повторяет схему устройства получения голограммы, дополняя ее элементами, необходимыми для реализации векторно-матричного умножения сигналов и регистрации его результата. Поэтому для оптимизации всей системы стоит обратить внимание на схему устройства идентификации. В дальнейшем будем рассматривать только схемы устройств идентификации, приводя пояснения о параметрах опорной волны при регистрации голограммы.

Рассмотрим несколько вариантов схем устройства идентификации защитного элемента голограммы с уменьшенными габаритными размерами.

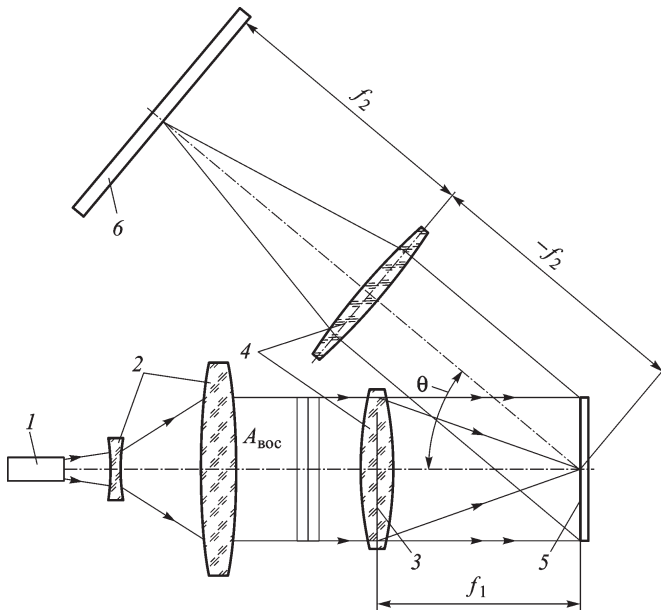
Схема, приведенная на рис. 5, имеет меньшие по сравнению со схемой, показанной на рис. 3, габаритные размеры из-за переноса ПВМС ЖК вплотную к фурье-преобразующему объективу. Это приводит к следующим изменениям:

— амплитуда объектной волны в плоскости регистрации голограммы (задняя фокальная плоскость фурье-преобразующего объектива) станет равна

$$\begin{aligned} A_{\text{гол}}(x'_1, y'_1) &= \tilde{A}_{\text{тр}}(\nu_x, \nu_y) \exp \left[ i\pi \lambda f'_1 (\nu_x^2 + \nu_y^2) \right] = \\ &= \tilde{A}_{\text{тр}} \left( \frac{x'_1}{\lambda f'_1}, \frac{y'_1}{\lambda f'_1} \right) \exp \left[ i \frac{\pi}{\lambda f'_1} (x'^2 + y'^2) \right]; \end{aligned}$$

— при использовании в качестве опорной плоской волны, падающей под углом  $\theta_{\text{оп}}$  к нормали голограммы, возникшее искажение





**Рис. 5. Схема устройства идентификации защитного элемента голограммы с уменьшенными габаритными размерами:**

1 – лазер; 2 – коллимирующая система; 3 – ПВМС ЖК; 4 – фурье-преобразующие объективы; 5 – рельефная голограмма с зеркальным покрытием; 6 – матричный ПЗС-фотоприемник

объектной волны не будет ничем скомпенсировано, что усложнит получение требуемого алгоритма неискаженной свертки функций  $f_1$  и  $f_2$ .

Восстановленная с голограммы волна будет иметь вид

$$\begin{aligned}
 A(x', y') = & A_{\text{восст}}(x', y') \tau_{\text{гол}}(x', y') \sim I_0(x', y') F_{x,y} \{f_2(-x, -y)\} + \\
 & + F_{x,y} \{f_2(-x, -y)\} F_{x,y}^* \{f_1(-x, -y)\} \exp[ikk'x' \sin(\theta_{\text{оп}})] + \\
 & + F_{x,y} \{f_2(-x, -y)\} F_{x,y} \{f_1(-x, -y)\} \exp\left[i\frac{2\pi}{\lambda f_1'}(x'^2 + y'^2)\right] \times \\
 & \times \exp[ikk'x' \sin(-\theta_{\text{оп}})]. \quad (4)
 \end{aligned}$$

Видно, что в выбранном направлении ( $-\theta_{\text{оп}}$ ) восстановленная с голограммы волна приобрела множитель  $\exp\left[i\frac{2\pi}{\lambda f_1'}(x'^2 + y'^2)\right]$ , что после второго фурье-преобразования создаст распределение амплитуды волны на приемнике вида

$$\begin{aligned}
 A(x_{\text{и}}, y_{\text{и}}) \sim & F_{v_x, v_y} \left\{ F_{x,y} \{f_2(-x, -y)\} \times \right. \\
 & \left. \times F_{x,y} \{f_1(-x, -y)\} \exp[i2\pi\lambda f_1'(v_x^2 + v_y^2)] \right\} = \\
 = & \left\{ f_2\left(\frac{x}{\beta}, \frac{y}{\beta}\right) \otimes f_1\left(\frac{x}{\beta}, \frac{y}{\beta}\right) \right\} \otimes \exp\left[i\frac{\pi}{2\lambda\beta^2 f_1'}(x^2 + y^2)\right]. \quad (5)
 \end{aligned}$$

Свертка искомой функции  $\left\{ f_2 \left( \frac{x}{\beta}, \frac{y}{\beta} \right) \otimes f_1 \left( \frac{x}{\beta}, \frac{y}{\beta} \right) \right\}$  с  $\exp \left[ i \frac{\pi}{2\lambda\beta^2 f_1'} (x^2 + y^2) \right]$  введет в сигнал, снимаемый с фотоприемника, систематическую ошибку, которая потребует введения сложного реставрирующего фильтра на этапе предобработки зарегистрированного сигнала.

Из этой ситуации можно выйти разными способами.

*Первый способ.* Использовать идентификацию по волне, описываемой вторым слагаемым в формуле (4), восстановленной с голограммы, в направлении, совпадающем с опорной волной при записи последней. Это не вносит каких-либо конструктивных изменений в схему устройства идентификации, кроме изменения положения второго фурье-преобразующего объектива. При этом следует учесть, что множитель, соответствующий спектру первой входной функции  $f_1(-x, -y)$ , в этом слагаемом замещен комплексно-сопряженным множителем  $F_{x,y}^* \{f_1(-x, -y)\}$ , который после второго фурье-преобразования обратится в функцию  $f_1(-x, -y)$  вместо требуемой  $f_1(x, y)$ . Следовательно, при записи голограммы функцию  $f_1(x, y)$  не нужно поворачивать на  $180^\circ$  относительно центра координат.

*Второй способ.* Можно изменить форму волнового фронта опорной волны с плоской на расходящуюся, т.е.

$$\begin{aligned} A_{\text{оп}}(x', y') &= \frac{1}{z} \exp \left( i \frac{\pi}{\lambda z} \left( (x' - x_0)^2 + y'^2 \right) \right) = \\ &= \frac{a_1}{z} \exp \left( i \frac{\pi}{\lambda z} x_0^2 \right) \exp \left( i \frac{\pi}{\lambda z} (x'^2 + y'^2) \right) \exp \left( -ikx' \frac{x_0}{z} \right). \end{aligned}$$

При этом направление восстановления будет задаваться, как и раньше, углом  $\theta_{\text{оп}}$ , равным (для небольших значений угла — менее  $10^\circ$ )  $\theta_{\text{оп}} = -\frac{x_0}{z}$ , где  $z$  — удаление точечного источника, создающего  $A_{\text{оп}}(x', y')$ , от плоскости голограммы ( $z > 0$ ).

Очевидно, что в опорную волну нужно ввести также дополнительную расходимость, компенсирующую аналогичный экспоненциальный множитель в восстанавливающей волне на этапе идентификации голограммы. Исходя из этих соображений, расстояние  $z$  от голограммы до источника опорной волны можно найти из соотношения

$$\begin{aligned} \exp \left[ i \frac{\pi}{\lambda f_1'} (x'^2 + y'^2) \right] \exp \left[ i \frac{\pi}{\lambda} \left( \frac{1}{f_1'} - \frac{1}{z} \right) (x'^2 + y'^2) \right] = \\ = 1 \rightarrow \left( \frac{1}{f_1'} + \frac{1}{f_1'} - \frac{1}{z} \right) = 0 \rightarrow z = \frac{f_1'}{2}. \quad (6) \end{aligned}$$

При этом с голограммы будет восстанавливаться волна без фазовых искажений, как в схеме на рис. 1.

Габаритные размеры схемы (см. рис. 4) можно еще уменьшить, изменив расстояние  $a$  от голограммы до второго фурье-преобразующего объектива. Это приведет к изменению амплитуды волны в плоскости приемника:

$$A(x_{\text{и}}, y_{\text{и}}) \sim \left\{ f_2 \left( \frac{x_{\text{и}}}{\beta}, \frac{y_{\text{и}}}{\beta} \right) \otimes f_1 \left( \frac{x_{\text{и}}}{\beta}, \frac{y_{\text{и}}}{\beta} \right) \right\} \exp [i\pi\lambda (f'_2 + a)],$$

но так как приемник регистрирует квадрат амплитуды волны, то экспоненциальный множитель  $\exp [i\pi\lambda (f'_2 + a)]$  не внесет искажений в регистрируемый сигнал

$$I(x_{\text{и}}, y_{\text{и}}) = |A(x_{\text{и}}, y_{\text{и}})|^2 = \left[ f_2 \left( \frac{x_{\text{и}}}{\beta}, \frac{y_{\text{и}}}{\beta} \right) \otimes f_1 \left( \frac{x_{\text{и}}}{\beta}, \frac{y_{\text{и}}}{\beta} \right) \right]^2.$$

Очевидно, что для уменьшения габаритных размеров объектив нужно приближать к голограмме. Минимальное расстояние  $a_{\text{min}}$  от голограммы до объектива ограничивается в основном конструктивными проблемами: корпус объектива пересекается с корпусом первого фурье-преобразующего объектива; восстанавливающая волна ввинчивается оправой объектива.

Учитывая последнее предложение, запишем соотношение габаритных размеров рассмотренной (см. рис. 4) и традиционной схем:

$$\frac{l_{\text{нов}}}{l_{\text{традиц}}} = \frac{f'_1 + a_{\text{min}} + f'_2}{2f'_1 + 2f'_2} = \frac{f'_1(1 + |\beta|) + a_{\text{min}}}{2f'_1(1 + |\beta|)} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2(1 + |\beta|)} \left( \frac{a_{\text{min}}}{f'_1} \right). \quad (7)$$

При значении практически реализуемого увеличения  $|\beta| = 6$  выражение (7) примет вид

$$\frac{l_{\text{нов}}}{l_{\text{традиц}}} = \frac{1}{2} + \frac{1}{14} \left( \frac{a_{\text{min}}}{f'_1} \right). \quad (8)$$

Из уравнения (8) видно, что даже при значении отношения  $a_{\text{min}}/f'_1 = 2$  предложенная схема практически в 2 раза компактнее традиционной.

Рассмотрим еще одну малогабаритную схему реализации устройства идентификации защитного элемента голограмм, представленную на рис. 6.

Эта голографическая схема, в которой используется только один фурье-преобразующий объектив на стадии идентификации голограмм [5], привлекательна значительно меньшими по сравнению с традиционной схемой габаритными размерами и отсутствием второго фурье-преобразующего объектива, что должно упростить устройство идентификации.

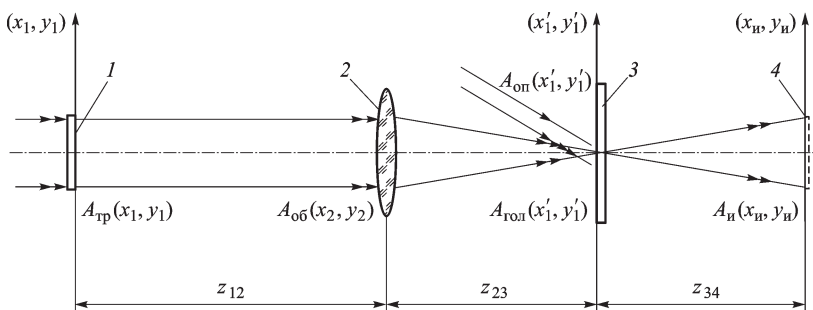


Рис. 6. Голографическая схема с одним фурье-преобразующим объективом

Схема включает ПВМС ЖК 1, фурье-преобразующий объектив 2 и регистрирующую среду 3. Действительное изображение транспаранта 4 формируется объективом 2 в выходной плоскости схемы. Между транспарантом и фурье-преобразующим объективом находится слой пространства толщиной  $z_{12}$ , следовательно, амплитуда и фаза объектной волны на входе объектива будут определяться дифракцией в этом слое. Когерентная функция рассеяния слоя пространства имеет вид [6, с. 88]

$$h_{фр}(x_2, y_2, z_{12}) = \frac{1}{ikz_{12}} \exp[ikz_{12}] \exp\left[i\frac{\pi}{\lambda z_{12}}(x_2^2 + y_2^2)\right], \quad (9)$$

где  $k = 2\pi/\lambda$  — волновое число;  $\lambda$  — длина волны излучения, используемая при получении голограммы.

Тогда распределение комплексной амплитуды излучения  $A_{об}(x_2, y_2)$  равно свертке функции амплитуды на выходе транспаранта  $A_{тр}(x_1, y_1)$  с функцией  $h_{фр}(x_2, y_2; z_{12})$ :

$$A_{об}(x_2, y_2) = A_{тр}(x_1, y_1) \otimes h_{фр}(x_2, y_2; z_{12}).$$

Комплексный коэффициент пропускания тонкого анаберрационного сферического объектива определяется формулой [6, с. 98]

$$\tau_{об}(x_2, y_2) = P_{зр}(x_2, y_2) \exp[-i\pi/(\lambda_3 f')(x_2^2 + y_2^2)],$$

где  $x_2, y_2$  — координаты в плоскости зрачка объектива;  $P_{зр}(x_2, y_2)$  — функция зрачка объектива;  $f'$  — заднее фокусное расстояние объектива.

Тогда комплексная амплитуда излучения на выходе объектива будет определяться как

$$A_{об}(x'_2, y'_2) = A_{об}(x_2, y_2) \tau_{об}(x_2, y_2) = A_{тр}(x_1, y_1) \otimes h_{фр}(x_2, y_2; z_{12}) \times P_{зр}(x_2, y_2) \exp[-i\pi/(\lambda_3 f')(x_2^2 + y_2^2)] \quad (10)$$

(для тонкого объектива можно считать  $x'_2 = x_2, y'_2 = y_2$ ).

Если принять допущение, что объектив не вносит потерь в проходящее излучение, то для функции зрачка можно записать

$$P_{\text{зр}}(x_2, y_2) = \begin{cases} 1, & \sqrt{x_2^2 + y_2^2} \leq \rho_{\text{зр}}; \\ 0, & \sqrt{x_2^2 + y_2^2} > \rho_{\text{зр}}, \end{cases}$$

где  $\rho_{\text{зр}}$  — радиус зрачка фурье-преобразующего объектива.

Тогда, если выбрать  $\rho_{\text{зр}}$  достаточно большим, можно в дальнейшем считать  $P_{\text{зр}}(x_2, y_2) = 1$  для любых значений координат в плоскости зрачка. С учетом этого и используя обозначения геометрической оптики  $z_{12} = -a$ , перепишем выражение (10) в виде

$$A_{\text{об}}(x'_2, y'_2) = A_{\text{тр}}(x_1, y_1) \otimes h_{\text{фр}}(x_2, y_2; -a) \exp[-i\pi/(\lambda_3 f')(x_2^2 + y_2^2)]. \quad (11)$$

Плоскость записи интерференционного поля расположена на расстоянии  $z_{23}$  от фурье-преобразующего объектива. Следовательно, комплексная амплитуда излучения в этой плоскости будет определяться как свертка распределения  $A_{\text{об}}(x'_2, y'_2)$  с функцией рассеяния слоя пространства  $h_{\text{фр}}(\xi, \eta; z_{23})$ , т.е.

$$A_{\text{гол}}(\xi, \eta) = A_{\text{об}}(x'_2, y'_2) \otimes h_{\text{фр}}(\xi, \eta; z_{23}). \quad (12)$$

В общем случае регистрирующая среда может находиться на любом расстоянии от фурье-преобразующего объектива. Однако для организации свертки в области пространственных частот нужно голограмму регистрировать в задней фокальной плоскости объектива 2, т.е.  $z_{23} = f'$ . Тогда, используя альтернативное представление преобразования Френеля [6, с. 88], из уравнений (11) и (12) получаем

$$\begin{aligned} A_{\text{гол}}(\xi, \eta) &= h_{\text{фр}}(\xi, \eta; f') \iint_{\infty} [A_{\text{тр}}(x_1, y_1) \otimes h_{\text{фр}}(x_2, y_2; -a)] \times \\ &\quad \times \exp\left[-i\frac{\pi}{\lambda f'}(x_2^2 + y_2^2)\right] \exp\left[i\frac{\pi}{\lambda f'}(x_2^2 + y_2^2)\right] \times \\ &\quad \times \exp\left[-i\frac{2\pi}{\lambda f'}(\xi x_2 + \eta y_2)\right] dx_2 dy_2 = h_{\text{фр}}(\xi, \eta; f') \times \\ &\quad \times \iint_{\infty} [A_{\text{тр}}(x_1, y_1) \otimes h_{\text{фр}}(x_2, y_2; -a)] \exp\left[-i\frac{2\pi}{\lambda f'}(\xi x_2 + \eta y_2)\right] dx_2 dy_2. \end{aligned} \quad (13)$$

Видно, что последнее выражение можно переписать так:

$$\begin{aligned} A_{\text{гол}}(\xi, \eta) &= h_{\text{фр}}(\xi, \eta; f') F\{A_{\text{тр}}(x_1, y_1) \otimes h_{\text{фр}}(x_2, y_2; -a)\} = \\ &= h_{\text{фр}}(\xi, \eta; f') F\{A_{\text{тр}}(x_1, y_1)\} F\{h_{\text{фр}}(x_2, y_2; -a)\}. \end{aligned} \quad (14)$$

Подставляя в соотношение (14) выражение для функции рассеяния слоя пространства (9) и проводя замену переменных  $\xi = \nu_x \lambda f'$  и  $\eta = \nu_y \lambda f'$ , где  $\nu_x$  и  $\nu_y$  — пространственные частоты, выражение (14) преобразуем к виду

$$\begin{aligned} A_{\text{гол}}(\nu_x, \nu_y) &= \exp[i\pi\lambda'(\nu_x^2 + \nu_y^2)] \times \\ &\times F\{A_{\text{тр}}(x_1, y_1)\} F\{\exp[-i\pi/(\lambda a)(x_2^2 + y_2^2)]\} = \\ &= \exp[i\pi\lambda f'(\nu_x^2 + \nu_y^2)] F\{A_{\text{тр}}(x_1, y_1)\} \exp[i\pi\lambda a(\nu_x^2 + \nu_y^2)] = \\ &= \exp[i\pi\lambda(f' + a)(\nu_x^2 + \nu_y^2)] F\{A_{\text{тр}}(x_1, y_1)\}. \end{aligned} \quad (15)$$

Из геометрической оптики известно, что  $z = f' + a$ , где  $z$  — расстояние от переднего фокуса объектива до точки, в которой предмет пересекает оптическую ось системы. Тогда комплексная амплитуда излучения как функция пространственных частот в плоскости регистрации интерференционного поля будет иметь вид:

$$A_{\text{гол}}(\nu_x, \nu_y) = \exp[i\pi\lambda z(\nu_x^2 + \nu_y^2)] \cdot F\{A_{\text{тр}}(x_1, y_1)\}. \quad (16)$$

Известно также, что

$$z' = -f'^2/z,$$

где  $z'$  — расстояние от заднего фокуса объектива до точки, в которой предмет пересекает оптическую ось системы. В рассматриваемой схеме  $z' = z_{34}$ . Тогда комплексную амплитуду излучения можно представить как функцию координат, преобразовав уравнение (16) к виду

$$\begin{aligned} A_{\text{гол}}(\xi, \eta) &= \exp[i\pi z/(\lambda f'^2)(\xi^2 + \eta^2)] F\{A_{\text{тр}}(x_1, y_1)\} = \\ &= \exp[-i\pi/(\lambda z_{34})(\xi^2 + \eta^2)] F\{A_{\text{тр}}(x_1, y_1)\}. \end{aligned} \quad (17)$$

Видно, что полученный результат отличается от выражения (3) фазовым множителем, который определяется геометрическими параметрами используемой оптической схемы. С учетом данного отличия можно заключить, что комплексная амплитуда излучения в плоскости записи интерференционного поля пропорциональна фурье-образу от функции распределения амплитуды в плоскости транспаранта.

Если транспарант освещается аксиальной плоской волной единичной амплитуды, то с точностью до размерности можно записать

$$A_{\text{тр}}(x_1, y_1) = \tau_{\text{тр}}(x_1, y_1),$$

где  $\tau_{\text{тр}}(x_1, y_1)$  — функция пропускания транспаранта.

Формирование голограммы происходит за счет регистрации интенсивности волнового поля, образующегося при когерентном сложении

распределения  $A_{\text{гол}}(\xi, \eta)$  с опорной волной  $A_{\text{оп}}(\xi, \eta)$  (см. рис. 6). Тогда комплексную амплитуду восстановленного излучения в плоскости 4 (см. рис. 6) на расстоянии  $z_{34}$  от плоскости записи волнового поля 3 можно определить как свертку функции комплексной амплитуды объектной волны  $A_{\text{гол}}(\xi, \eta)$  с функцией Френеля  $h_{\text{фр}}(x_{\text{и}}, y_{\text{и}}, z_{34})$ . С учетом выражения (17) запишем

$$\begin{aligned} A_{\text{и}}(x_{\text{и}}, y_{\text{и}}) &= h_{\text{фр}}(x_{\text{и}}, y_{\text{и}}; z_{34}) \iint_{\infty} F\{A_{\text{тр}}(x_1, y_1)\} \times \\ &\times \exp\left[-i\frac{2\pi}{\lambda z_{34}}(x_1\xi + y_1\eta)\right] \exp\left[-i\frac{\pi}{\lambda z_{34}}(\xi^2 + \eta^2)\right] \times \\ &\times \exp\left[i\frac{\pi}{\lambda z_{34}}(\xi^2 + \eta^2)\right] d\xi d\eta = h_{\text{фр}}(x_{\text{и}}, y_{\text{и}}; z_{34}) F\{F\{A_{\text{тр}}(x_1, y_1)\}\} = \\ &= h_{\text{фр}}(x_{\text{и}}, y_{\text{и}}; z_{34}) A_{\text{тр}}(-x_{\text{и}}, -y_{\text{и}}). \end{aligned}$$

Данный результат отличается от аналогичного, полученного для голографической схемы Фурье с двумя объективами, фазовым множителем. Восстановленная волна регистрируется фоточувствительной средой, реагирующей на интенсивность излучения в изображении  $I_{\text{и}}$ , которая равна

$$I_{\text{и}}(x_{\text{и}}, y_{\text{и}}) = A_{\text{и}}(x_{\text{и}}, y_{\text{и}})A_{\text{и}}(x_{\text{и}}, y_{\text{и}})^* = A_{\text{тр}}^2(-x_{\text{и}}, -y_{\text{и}}). \quad (18)$$

С учетом того, что

$$x_{\text{и}} = \nu_x \lambda z_{34}, \quad y_{\text{и}} = \nu_y \lambda z_{34}$$

и

$$\nu_x = x_1/(\lambda f'), \quad \nu_y = y_1/(\lambda f'),$$

выражение (14) можно привести к координатам в плоскости транспаранта:

$$I_{\text{и}}(x_1, y_1) = A_{\text{тр}}^2(-x_1 z'/f', -y_1 z'/f') = A_{\text{тр}}^2(x_1 \beta, y_1 \beta),$$

где  $\beta = -z_{34}/f' = -z'/f' -$  увеличение объектива.

Полученный результат соответствует исходному кодовому изображению, перевернутому и масштабированному в соответствии с фактическими параметрами рассмотренной оптической схемы. Таким образом, голографическая схема Фурье с одним объективом может быть использована в устройствах получения и идентификации защитных элементов голограмм.

Оценим уменьшение габаритных размеров оптической системы устройства идентификации по сравнению с традиционной схемой:

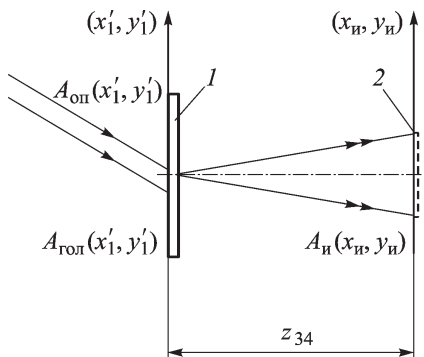


Рис. 7. Схема возможной несанкционированной регистрации защитного элемента с голограммы, записанной по схеме с одним фурье-преобразующим объективом

$$\frac{l_{\text{нов2}}}{l_{\text{традиц}}} = \frac{z_{12} + f_1 + z_{34}}{2f'_1 + 2f'_2} = \frac{-a + a'}{2f'_1 - 2\beta f'_1} = \frac{-(1 - \beta) \frac{f'_1}{\beta} + (1 - \beta) f'_1}{2f'_1 (1 - \beta)} = \frac{1}{2} - \frac{1}{2\beta}. \quad (19)$$

При значении практически реализуемого увеличения  $\beta = -6$  из выражения (19) получаем

$$\frac{l_{\text{нов2}}}{l_{\text{традиц}}} = \frac{1}{2} + \frac{1}{12} = \frac{7}{12} = 0,583. \quad (20)$$

Из уравнения (20) видно, что рассмотренная схема позволяет избавиться от одного из объективов и незначительно выиграть в компактности по сравнению с предыдущей схемой (см. (8)). Но отказ от использования в схеме устройства идентификации второго фурье-преобразующего объектива помимо положительного эффекта упрощения его оптической схемы — снижает стойкость всей разрабатываемой системы к “взлому”.

Как было показано (см. формулу (17)) при подсвечивании голограммы 1 (рис. 7) волной, идентичной опорной волне (плоская волна), в плоскости 2 восстанавливается изображение, выводимое на ПВМС ЖК при получении голограммы (см. рис. 6), и, следовательно, оно может быть зарегистрировано без использования устройства идентификации, что упрощает подделку голограммы. В то же время голограмма, полученная по схеме, изображенной на рис. 5, при освещении плоской волной с тем же наклоном, что и у опорной, восстановит волну вида

$$A(x', y') = \exp(ikx' \sin \theta_{\text{оп}}) \tau_{\text{гол}}(x', y') \sim I_0(x', y') \exp(ikx' \sin \theta_{\text{оп}}) + F_{x,y}^* \{f_1(-x, -y)\} \exp \left[ -i \frac{\pi}{\lambda} \left( \frac{1}{f'_1} - \frac{1}{z} \right) (x'^2 + y'^2) \right] \times$$



$$\begin{aligned} & \times \exp [i2kx' \sin (\theta_{\text{он}})] + \\ & + F_{x,y} \{f_1 (-x, -y)\} \exp \left[ -i\frac{\pi}{\lambda} \left( \frac{1}{f'_1} - \frac{1}{z} \right) (x'^2 + y'^2) \right]. \end{aligned}$$

Подставляя из уравнения (6) значение для  $z$ , получаем распределение амплитуды в рабочем порядке дифракции с голограммы

$$\begin{aligned} A_{\text{раб}} (x', y') & \sim F_{x,y} \{f_1 (-x, -y)\} \exp \left[ -i\frac{\pi}{\lambda} \left( \frac{1}{f'_1} - \frac{1}{z} \right) (x'^2 + y'^2) \right] = \\ & = F_{x,y} \{f_1 (-x, -y)\} \exp \left[ i\frac{\pi}{\lambda f'_1} (x'^2 + y'^2) \right]. \end{aligned}$$

Очевидно, что, зарегистрировав интенсивность данной волны, практически невозможно установить вид изображения, выводимого на ПВМС ЖК при записи голограммы, из-за потери фазовой части спектра  $F_{x,y} \{f_1 (-x, -y)\}$ .

Использование при регистрации этой волны фурье-преобразующего объектива перед приемником с фокусным расстоянием  $f'_2$  приведет к следующему распределению амплитуды волны на приемнике:

$$\begin{aligned} A (x_{\text{и}}, y_{\text{и}}) & \sim F \left\{ F_{x,y} \{f_1 (-x, -y)\} \exp \left[ i\frac{\pi}{\lambda f'_1} (x'^2 + y'^2) \right] \right\} \sim \\ & \sim f_1 \left( \frac{f'_1}{f'_2} x_{\text{и}}, \frac{f'_1}{f'_2} y_{\text{и}} \right) \otimes \exp \left[ i\pi \frac{f'_1}{f'_2} (x_{\text{и}}^2 + y_{\text{и}}^2) \right] = \\ & = f_1 \left( \frac{x_{\text{и}}}{\beta}, \frac{y_{\text{и}}}{\beta} \right) \otimes \exp \left[ i\pi \frac{1}{\beta} (x_{\text{и}}^2 + y_{\text{и}}^2) \right], \quad (21) \end{aligned}$$

зарегистрировав интенсивность которой, также невозможно установить вид функции  $f_1 (x, y)$ .

Предположим, что голограмму под нужным углом (равным углу подсвета опорной волны) подсветили сферической волной, тогда восстановленная с голограммы волна будет иметь вид

$$\begin{aligned} A (x', y') & = \exp \left( i\frac{\pi}{\lambda z} (x'^2 + y'^2) \right) \exp (ikx' \sin \theta_{\text{он}}) \tau_{\text{гол}} (x', y') \sim \\ & \sim I_0 (x', y') \exp \left( i\frac{\pi}{\lambda z} (x'^2 + y'^2) \right) \exp (ikx' \sin \theta_{\text{он}}) + \\ & + F_{x,y}^* \{f_1 (-x, -y)\} \exp \left[ i\frac{\pi}{\lambda} \left( \frac{1}{f'_1} + \frac{1}{z} \right) (x'^2 + y'^2) \right] \exp [i2kx' \sin (\theta_{\text{он}})] + \\ & + F_{x,y} \{f_1 (-x, -y)\} \exp \left[ i\frac{\pi}{\lambda} \left( \frac{1}{f'_1} + \frac{1}{z} \right) (x'^2 + y'^2) \right]. \quad (22) \end{aligned}$$

Из выражения (22) видно, что возможность зарегистрировать на приемнике сигнал, пропорциональный  $f_1(-x, -y)$ , существует только в единственном случае. Восстанавливающая волна должна быть сходящейся в точку, расположенную за голограммой на расстоянии  $z = -f_1'$ . При этом также необходимо использовать фурье-преобразующий объектив, аналогичный установленному в схеме идентификатора для получения информации о реальном масштабе функции уравнение  $f_1(-x, -y)$  (см. (21)). Очевидно, что выполнение всех этих условий делает вероятность удачного “взлома” системы идентификации защитного элемента путем несанкционированной попытки восстановления функции  $f_1(-x, -y)$  чрезвычайно низкой.

**Выводы.** Показано, что для реализации системы контроля подлинности защитных голограмм, основанной на векторно-матричном оптическом умножителе, использующем алгоритм ЦУАС с пространственно-частотной сверткой оптических сигналов, можно использовать широко распространенную схему оптических корреляторов 4F. Но для получения компактных устройств идентификации ее нужно модернизировать. Также показано, что упрощение оптической схемы устройства идентификации может привести к потере системой защиты от несанкционированного доступа ко внутренней системной информации.

Полученные результаты являются очень важными для математического моделирования работы системы идентификации защитных голограмм в условиях погрешностей и искажений, которые могут возникнуть при реальных условиях эксплуатации системы. Такое моделирование, а также создание экспериментального стенда будут основным направлением дальнейшей работы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. O d i n o k o v S. B., B o r i s o v M. V., K r u t o v B. P., B o n d a r e v L. A., S m y k A. F. Hologram authenticity test device // Proc. SPIE. – 1999. – Vol. 3637. – P. 213–217.
2. В а с и л е н к о Г. И., Ц и б у л ь к и н Л. М. Голографические распознающие устройства. – М.: Радио и связь, 1985. – 312 с.
3. О п т и ч е с к и е вычисления / Б. Хилл, Н. Пейгамбарян, Дж. Джуэлл и др. – М.: Мир, 1983. – 441 с.
4. В е р е н и к и н а Н. М., Р о ж к о в О. В., Т и м а ш о в а Л. Н. Оптика когерентных процессоров: Учеб. пособ. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1991. – 148 с.
5. О д и н о к о в С. Б., Б о р и с о в М. В. Оптическая система устройства для получения матрицы голограмм // Вестник МГТУ. Серия “Приборостроение”. – 1998. – № 3. – С. 14–23.
6. М о с я г и н Г. М., Н е м т и н о в В. Б., Л е б е д е в Е. Н. Теория оптико-электронных систем. – М.: Машиностроение, 1990. – 432 с.

Статья поступила в редакцию 12.09.2008

Сергей Борисович Одинокоев родился в 1950 г., окончил в 1973 г. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Канд. техн. наук, доцент кафедры “Лазерные и оптико-электронные системы” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор около 150 научных работ в области оптоэлектронной обработки информации и голографии.



S.B. Odinokov (b. 1950) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 1973, assistant professor of the “Laser and Optoelectronic Systems” department of the Bauman Moscow State Technical University. Member of the Rozhdestvensky Optical Society. Has about 150 publications in the field of holography and optoelectronic information processing.

Александр Юрьевич Павлов родился в 1983 г., аспирант кафедры “Лазерные и оптико-электронные системы” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 10 научных работ в области оптоэлектронной обработки информации, голографии и информационных защитных технологий.



A. Yu. Pavlov (b. 1983) is postgraduate of 1th year at the Bauman Moscow State Technical University at the “Laser and Optoelectronic Systems” chair, has written more 10 scientific works in the field of holography, optoelectronic information processing and security information technics.

---

**В издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана  
в 2008 г. вышла в свет книга**

**Колесников К.С.**

Рассказ о моей жизни. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008.  
– 360 с.

Автобиографическая книга профессора МГТУ им. Н.Э. Баумана, академика РАН Константина Сергеевича Колесникова представляет собой яркое жизнеописание человека интереснейшей судьбы. Перед нами история личности на фоне крупнейших событий двадцатого столетия, пример целеустремленности фронтовика-бауманца, который жаждал учиться и добился максимальной самореализации.

Читатель — студент или выпускник МГТУ им. Н.Э. Баумана — почерпнет из этой книги немало ценной информации о развитии университета во второй половине XX в., воспитании молодежи, замечательных ученых, блестящих педагогах, которыми по праву гордится наша alma mater.

Неподдельная искренность автора, рассказывающего о пройденном им пути, побуждает к серьезному размышлению, поиску ответов на волнующие современника вызовы нынешней эпохи.

По вопросам приобретения обращаться по тел. (499) 263-60-45;  
e-mail: [press@bmstu.ru](mailto:press@bmstu.ru)