

## **ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЙ МАТРИЧНЫЙ ПРОЦЕССОР ИДЕНТИФИКАЦИИ ПОДЛИННОСТИ ЗАЩИТНЫХ ГОЛОГРАММ С КОДИРОВАННЫМИ СКРЫТЫМИ ИЗОБРАЖЕНИЯМИ**

*Рассмотрены методы кодирования скрытых изображений в голограммах, используемые для повышения их степени защиты от подделки, и автоматизации контроля их подлинности. Предложены в качестве кодирующего–декодирующего алгоритма операции векторно-матричного умножения, выполняемые над оптическими сигналами по методу цифрового умножения с помощью аналоговой свертки. Проведен анализ возможных оптических схем реализации выбранного алгоритма. Для схемы с реализацией аналоговой свертки в области пространственных частот проведены габаритный, светоэнергетический и абберрационный расчеты оптической схемы устройства.*

Защита от массовой подделки материальных объектов — это одна из серьезных проблем, стоящих перед мировой экономикой и государственными организациями разных стран. Материальный и моральный ущерб, который подделки причиняют производственным, торговым и финансовым предприятиям всего мира, огромен. От подделки страдают бумажные документы (банкноты и ценные бумаги, нотариальные документы, удостоверения личности и сертификаты и т.п.), дорогостоящие эксклюзивные товары известных марок и изделия массового производства (парфюмерия, спиртные напитки, сигареты, лекарственные препараты и т.д.), аудиовидеопродукция и программное обеспечение, кредитные карты и т.п.

В настоящее время традиционные полиграфические элементы защиты (ЭЗ) не могут успешно противостоять копированию и имитации. Альтернативным видом полиграфических ЭЗ являются защитные голограммы, имеющие уникальные свойства, присущие данному способу записи информации.

Применяемые в настоящее время защитные голограммы (ЗГ) включают в себя скрытые изображения, идентификация которых возможна только оптико-электронными средствами.

Основными видами скрытых изображений являются: микротекст или микроизображения, которые контролируются визуально при использовании увеличивающей оптики [1]; изображения, записанные на ЗГ в когерентном свете, наблюдение которых, соответственно, возможно тоже только в когерентном свете [2]; изображения, записанные на

ЗГ с помощью искаженных волновых фронтов либо в канале опорного луча, либо в канале объектного луча с помощью диффузных рассеивателей света или специальных масок [3–7].

Главным недостатком первых и вторых скрытых изображений является простота их обнаружения при использовании простейших приборов (микроскоп, линзовый растр, лазер). Скрытые изображения третьего вида лишены этого недостатка и обеспечивают высокую степень скрытности записанного изображения, однако для восстановления таких изображений необходимо применять точную копию кодирующей маски, которую получить трудно или практически невозможно, как, например, в случае применения диффузных рассеивателей.

Таким образом, для всех рассмотренных видов скрытых изображений характерно использование не изменяемых кодирующих элементов (объективы, линзовые растры, диффузные рассеиватели, фазовые маски). Это вносит значительные трудности при применении этих методов на практике: необходимы широкий набор кодирующих масок или уникальные оптические элементы. Соответственно, решением этих проблем является использование в качестве кодирующей маски динамического изменяемого элемента, например, акустооптического кристалла или жидкокристаллического модулятора света.

В любом случае, на принятие окончательного решения о подлинности ЗГ влияют параметры самой голограммы, условия наблюдения и способности наблюдателя к восприятию и интерпретации полученной информации. Автоматизация этого процесса не только позволит избавиться от влияния указанных субъективных факторов, но и повысит степень защиты голограммы от подделки.

Цель настоящей работы — разработка функциональной и оптической схем оптико-электронного матричного процессора для идентификации подлинности защитных голограмм с кодированием–декодированием скрытых изображений с помощью жидкокристаллического модулятора света в оптической схеме записи–восстановления скрытых изображений и с элементами компьютерной криптографической обработки скрытых изображений в электронном блоке.

**Анализ алгоритмов работы приборов ОПЗГ.** Принцип определения подлинности объекта в общем случае заключается в извлечении присущей ему индивидуальной информации в виде скрытого изображения и сравнении ее с эталоном. При идентичности считанной с объекта и эталонной информации объект считается подлинным, в противном случае – поддельным. Исходная анализируемая информация, как правило, должна быть предварительно записана на объект (носитель), сохранена в нем в течение длительного промежутка времени с возможно меньшими потерями и воспроизведена для сравнения.

Таким образом, можно выделить основные этапы процесса определения подлинности ЭЗ: 1) формирование и запись исходной информации в виде скрытого изображения; 2) хранение записанной информации; 3) считывание записанной информации в виде скрытого изображения; 4) сравнение считанной и эталонной информации и вынесение решения об их соответствии.

Рассматривая ЗГ на этапах 1–3 не только как носителя информации, но и как канал передачи информации через пространство и время с помехами, можно описать его в терминах теории связи.

Основной задачей, которая обычно возникает при передаче информации по каналу связи, является вынесение суждения о структуре и свойствах входного сигнала по определенным характеристикам выходного сигнала. Используемая при этом операция кодирования информации преследует три цели: преобразование информации в вид, в котором может быть утрачена преимущественно та ее часть, которая не представляет интереса при решении основной задачи передачи информации; приспособление формы (в том числе физической природы) сигнала к используемому каналу связи; сокрытие передаваемой информации от несанкционированного использования.

Следовательно, необходимо закодировать исходную информацию, осуществить ее хранение, считывание и декодирование.

В приборах идентификации ЗГ информация проходит, по крайней мере, по двум каналам — эталонному и объектному (количество и тех и других может быть увеличено для повышения избыточности передачи). Базовым звеном объектного канала является ЭЗ. Эталонная информация может быть передана различными путями.

Эталон может храниться непосредственно в приборе. При этом он либо представляет собой физический аналог ЭЗ, либо формируется в момент сравнения из информации, записанной в какой-либо другой форме. При этом эталонная информация может оставаться полностью закрытой от пользователя. Этот способ требует постоянного хранения всех эталонов, которые могут потребоваться для сравнения.

Другой способ состоит в передаче эталонной информации по каналу, включающему оператора. В этом случае оператор должен ввести информацию в прибор непосредственно перед моментом определения подлинности ЭЗ. При этом нет необходимости постоянно хранить эталонную информацию в приборе, однако должно быть обеспечено ее перекодирование для приведения в форму, удобную для сравнения.

Без учета процессов кодирования–передачи–декодирования задача определения подлинности состоит в сравнении объектной и эталонной информации, т.е. сводится к типичной операции распознавания.



Рис. 1. Структурная схема опико-электронного устройства идентификации ЗГ с точки зрения разделения на конструктивные элементы

Структурная схема устройства идентификации ЗГ показана на рис. 1.

**Анализ методов обработки оптической информации, применяемых в приборах идентификации подлинности ЗГ.** Все устройства, входящие в канал кодирования–передачи–декодирования, должны оптимальным образом выполнять функцию преобразования формы поступающей информации так, чтобы она наилучшим образом соответствовала возможностям передачи через последующее звено без потерь и искажений, и функцию защиты информации от несанкционированного доступа, изменения и копирования (шифрование).

Как было отмечено, способ передачи информации в виде защитной голограммы достаточно эффективен при решении задачи ее преобразования и повышения устойчивости к случайным и преднамеренным искажениям. Голографическая запись по своей сути уже операция кодирования оптического сигнала, удачно сочетающая надежность и простоту. Однако специфика применения приборов ОПЗГ может потребовать увеличения криптостойкости используемого метода кодирования.

Существуют два основных пути повышения степени защищенности информации, которая регистрируется и воспроизводится голографическим методом, — это кодирование опорного пучка и кодирование изображения.

Идея метода голограмм с кодированным опорным пучком состоит в том, что при получении голограммы точечного источника по схеме Френеля плоский волновой фронт искажается кодовой фазовой маской. При восстановлении голограммы излучением, проходящим через ту же кодовую маску, изображение точечного источника возникает в том же месте, где оно было при записи, и может быть зарегистрировано с помощью фотоприемного устройства или визуально. При отсутствии кодовой маски или ее отличии от той, что была использована при записи, изображение точечного источника не восстанавливается.

Исследования показывают, что эффективность метода наиболее высока тогда, когда фазовые искажения, вносимые кодирующим элементом, достаточно велики. Использование случайного диффузного рассеивателя с этой точки зрения является оптимальным. Однако, если функция фазового кода не будет достаточно медленно меняющейся в любом направлении вдоль плоскости маски, необходимость исключительно точной юстировки положения тестируемой карты может привести к значительным сложностям в реализации.

Сдвиг кодирующей маски относительно исходного положения на величину, соизмеримую с размером элементарного фазоискажающего участка, будет приводить к исчезновению восстановленного с голограммы изображения. Указанный недостаток настолько серьезен, что ставит под сомнение практическую применимость описанного метода.

Метод кодирования изображения состоит с том, что кодирование двумерного образа осуществляется путем его умножения на случайную фазовую функцию с равномерным распределением, после чего проводится запись полученного волнового фронта на голограмму. При восстановлении для получения действительного изображения необходимо осветить голограмму волной, комплексно сопряженной с опорной волной. Восстановленный с голограммы волновой фронт пропускается через ту же, что и при записи, фазовую кодовую маску, восстанавливающую исходное изображение.

Данный метод требует использования обязательно только фазовой кодовой маски. Кодовая маска должна быть отделена от кодируемого изображения слоем пространства, при не выполнении этого условия, т.е. если кодовая маска и кодируемое изображение будут находиться рядом в геометрическом приближении, кодирования изображения не происходит.

Голографическая запись информации также имеет повышенную стойкость к потере данных, так как информация о каждой точке объекта распределяется по всей площади голограммы и потеря некоторой части площади голограммы не приводит к потере информации о всем исходном изображении, а только к ухудшению качества восстановленного изображения (не происходит восстановления мелких деталей, возникает зернистая структура).

Дополнительное кодирование информации ЭЗ связано с алгоритмами обработки скрытых изображений, восстановленных с ЗГ, т.е. это работа с отдельными участками восстановленного изображения.

Рассмотрим некоторые варианты алгоритмов обработки восстановленных кодированных изображений.

**Применение для кодирования и декодирования оптико-электронного векторно-матричного множителя.**

*Представление операции перемножения оптических сигналов как их свертки.* Для обеспечения условий стыковки оптических элементов

изображения с электронными схемами скрытые изображения ЗГ, как правило, представляют собой двоичные двумерные структуры (плоские изображения, состоящие из светлых и темных однотипных элементов простой формы). Таким образом, их можно рассматривать как векторы или матрицы, состоящие из чисел в двоичной форме, а обработку таких изображений — как математические операции над векторами и матрицами. Например, если свет с интенсивностью  $I_1$  проходит через модулятор с коэффициентом пропускания  $t_1$ , результирующая интенсивность света  $I_2$  равна  $I_1 t_1$ , что эквивалентно умножению чисел  $I_1$  и  $t_1$ .

Одним из возможных вариантов обработки изображения (двоичной матрицы или вектора), восстановленного с ЗГ, является его перемножение на пространственном модуляторе света (ПМС) с матрицей или вектором и последующее сравнение полученного результата с эталоном. Существуют несколько базовых вариантов алгоритма такого оптического векторно-матричного умножения, имеющих общее название — алгоритмы цифрового умножения с помощью вычисления аналоговой свертки (ЦУАС) [8].

Умножение двух чисел эквивалентно выполнению свертки над их цифровыми представлениями в том случае, если результат свертки интерпретируется в смешанном формате, в котором для основания числа  $b$  отдельные цифры могут иметь величины, большие чем  $b$ . В общем, если необходимо умножить по основанию  $b$  два  $N$ -разрядных числа, представленных как

$$x = \sum_{n=1}^N x_n b^{n-1} \quad \text{и} \quad y = \sum_{m=1}^N y_m b^{m-1},$$

где  $x_n$  и  $y_n$  — отдельные цифры, то результат выглядит так:

$$xy = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^N x_n y_m b^{(n+m-1)-1} = \sum_{k=1}^{2N-1} \left( \sum_{n=1}^k x_n y_{k-n+1} \right) b^{k-1},$$

где  $k = n + m - 1$ .

Рассмотрим цифры в числах  $x$  и  $y$ , представляющих собой две функции, которые следует перемножить. Для выполнения свертки запишем цифры числа  $y$  в обратном порядке и разместим их после цифр числа  $x$ . Первым значением свертки является  $x_1 y_1$ , вторым  $x_1 y_2 + x_2 y_1$  и так до значения  $x_N y_N$ ;  $k$ -е значение свертки равно  $\sum_{n=1}^k x_n y_{k-n+1}$ , что в точности является  $k$ -й цифрой произведения  $xy$ .

Имеются два способа выполнения операций свертки в оптике: свертка в области пространственных частот и во временной области.



*Операция свертки оптических сигналов в области пространственных частот.* Как известно, свертка двух функций может быть представлена как обратное фурье-преобразование произведения фурье-образов этих функций, т.е.  $f_1(t) \otimes f_2(t) = F^{-1} \{F \{f_1(t)\} \cdot F \{f_2(t)\}\}$ , следовательно, выполнение свертки может происходить в фурье-плоскости объектива.

Преобразование Фурье одной функции осуществляется линзой, а преобразование Фурье второй функции зарегистрировано в голограмме. Для осуществления свертки выполняется фурье-преобразование результата произведения фурье-образов с помощью второй линзы. При этом результат свертки двоичных функций является функцией смешанного формата. Использование не обратного, а прямого преобразования Фурье, как известно, приведет только к необходимости изменения направления осей координат в плоскости восстановленного изображения для правильной трактовки результата.

Например, рассмотрим случай умножения  $5 \times 7 = 35$ , что в двоичной записи выглядит так  $101 \times 111 = 100011$  (результат произведения в смешанном формате имеет вид 11211). Входные сигналы могут быть представлены в виде суммы дельта функций  $\delta(X - X_0)$  (двоичные единицы), разнесенных между собой на расстояния  $n \times a$ , где  $n$  — номер разряда, что не совсем корректно, так как любой реальный источник имеет конечную ширину, но для наглядности его шириной пренебрегаем. Учет ширины источника приведет к некоторому размытию конечной картины. Таким образом, входные сигналы имеют вид

$$101 \rightarrow \delta(X) + \delta(X - 2a) \xrightarrow{F} 1 + e^{-i2\pi\nu 2a};$$

$$111 \rightarrow \delta(X) + \delta(X - a) + \delta(X - 2a) \xrightarrow{F} 1 + e^{-i2\pi\nu a} + e^{-i2\pi\nu 2a},$$

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

Перемножая два выражения, получаем

$$\begin{aligned} (1 + e^{-i2\pi\nu 2a}) (1 + e^{-i2\pi\nu a} + e^{-i2\pi\nu 2a}) = \\ = 1 + e^{-i2\pi\nu(a)} + 2e^{-i2\pi\nu(2a)} + e^{-i2\pi\nu(3a)} + e^{-i2\pi\nu(4a)}. \end{aligned}$$

Проводя обратное преобразование Фурье, получим результат свертки:

$$\begin{aligned} 1 + e^{-i2\pi\nu(a)} + 2e^{-i2\pi\nu(2a)} + e^{-i2\pi\nu(3a)} + e^{-i2\pi\nu(4a)} \xrightarrow{F^{-1}} \\ \rightarrow \delta(X) + \delta(X - a) + 2\delta(X - 2a) + \delta(X - 3a) + \delta(X - 4a). \end{aligned}$$

Этот результат, как и следовало ожидать, соответствует выходной функции 11211. Отметим, что количество разрядов в результате перемножения равно  $2k - 1$ , где  $k$  — число разрядов в перемножаемых числах, а максимальное значение сигнала при перемножении двух  $k$ -разрядных чисел равно  $k$ .

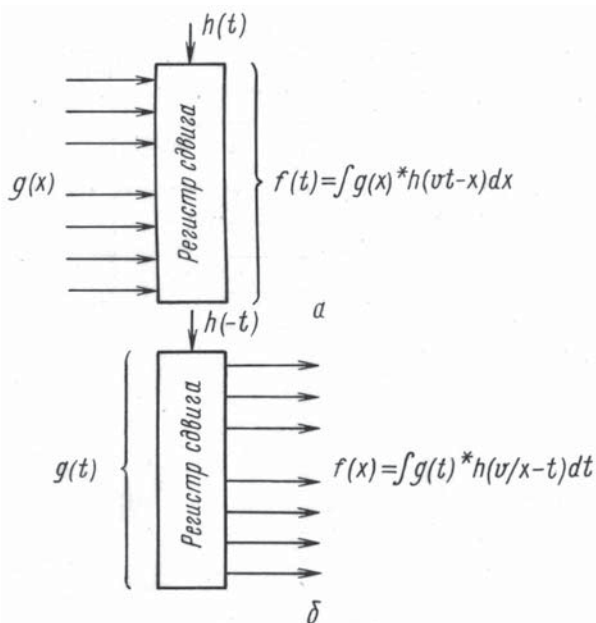
Интерпретируя матрицу из нулей и единиц как вектор из чисел двоичного формата, рассмотренную частотную свертку можно применить для операций векторно-матричного перемножения.

Достоинствами алгоритма являются простота выполнения процедуры ЦУАС и статичность во времени одной из входных функций (фурье-голограмма).

*Операция свертки оптических сигналов во временной области.* В данном алгоритме свертка вычисляется путем поддержания преобразованной функции одного из входных сигналов (функции с обратной зависимостью от времени) в постоянном виде, а вторая функция изменяется относительно нее. Их произведение во всех точках образует свертку.

Временная свертка может быть организована по двум схемам: с пространственным интегрированием и с временным интегрированием.

По первой схеме (рис. 2, а) оба входных сигнала являются пространственно-изменяющимися функциями, а устройство реализации алгоритма, сдвигая один сигнал относительно другого, на каждом шаге суммирует произведения сигналов во всех точках пространства. Таким



**Рис. 2.** Временная свертка с пространственным (а) и временным (б) интегрированием



образом, если функция  $g(x)$  поддерживается постоянной во времени, а вторая функция  $h(t)$  сдвигается относительно нее, то временную зависимость  $f(t)$  на выходе из устройства, осуществляющего свертку, можно представить в виде  $f(t) = \int g(x)h(vt - x)dx$ , где  $v$  — скорость сдвига функции  $h(t)$  относительно  $g(x)$ .

По второй схеме (рис. 2, б) функция  $g(t)$  подается на устройство свертки в качестве зависящего от времени сигнала и равномерно засвечивает все ячейки. Вторая функция  $h(-t)$  с обратной зависимостью сигнала от времени сдвигается относительно нее по пространству (ячейкам). Результат свертки снимается с устройства как пространственная зависимость значений сумм по времени произведений сигналов в каждой ячейке, т.е. результирующий сигнал  $f(x)$  равен  $f(x) = \int g(t)h\left(\frac{x}{v} - t\right)dt$ , где  $v$  — скорость сдвига функции  $h(-t)$  по ячейкам.

Использование второй схемы реализации временной свертки в устройствах, где один из входных сигналов записан на голограмму, ограничено из-за необходимости получения обоих входных сигналов как временных зависимостей.

К достоинствам временной свертки можно отнести удобство ее использования в векторно-матричном умножении при увеличении числа входных сигналов, а также широкую и отработанную элементную базу ее реализации.

### **Варианты оптических схем устройства ОПЗГ.**

*Устройство реализации свертки в области пространственных частот.* Для реализации устройства со сверткой сигналов в области пространственных частот можно предложить схему, приведенную на рис. 3.

Коллимированный лазерный пучок от полупроводникового лазера, проходя через жидкокристаллическую матрицу (ЖК-модулятор), на которой создается пространственное распределение коэффициента пропускания (прозрачные и непрозрачные зоны), задает первую входную функцию. На голограмме зарегистрирован фурье-спектр второй функции (аналогичный первой).

Через фурье-преобразующий объектив № 1 (ФПО № 1) на голограмме создается фурье-образ первого входного сигнала. Волна, восстановленная при этом с голограммы, представляет собой произведение фурье-образов входных функций. Фурье-преобразующий объектив № 2 (ФПО № 2) производит второе фурье-преобразование и создает на ПЗС-матрице изображение, соответствующее свертке входных сигналов в смешанном формате.

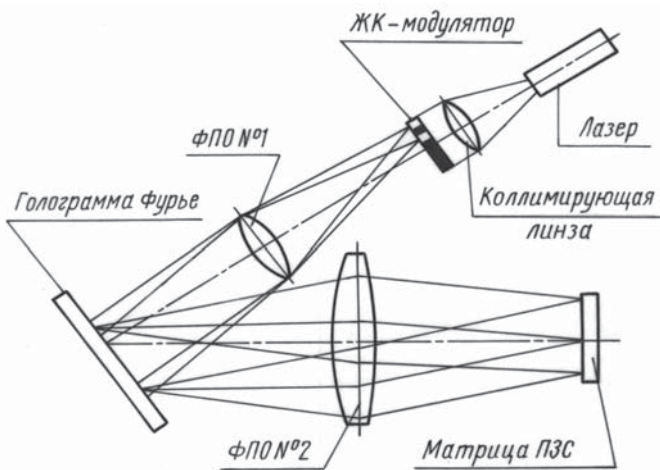


Рис. 3. Схема устройства со сверткой сигналов в области пространственных частот

Голограмма разлагает восстанавливающий пучок на дифракционные пучки  $0, \pm 1, \pm 2, \dots$  порядков. Нулевой порядок представляет собой несколько размытое из-за дифракции изображение ЖК-модулятора. Пучки первого порядка являются сверткой и корреляцией входных сигналов. Пучки высших порядков содержат намного меньше энергии, чем пучки  $0, \pm 1$ , являются вредными и представляют собой сложные комбинации произведений входных сигналов.

Из сказанного следует, что приемник нужно располагать таким образом, чтобы на него попадал только один из пучков первого порядка, и стремиться при записи голограммы и восстановлении с нее изображения к увеличению энергии в пучках первого порядка и уменьшению ее в других.

Устройство с временной сверткой имеет ряд преимуществ по сравнению с другими схемами: простота реализации векторно-матричного перемножения оптических сигналов; простота конструкции, так как используется свойство линз выполнять фурье-преобразование над сигналами; использование фурье-преобразующих объективов, параметры которых (фокусные расстояния, относительные отверстия) влияют на сигналы и, следовательно, являются дополнительной защитой от несанкционированного копирования защитной голограммы.

К недостаткам данной схемы можно отнести низкую энергетику, т.е. необходимость использования достаточно мощного источника излучения, а также сложности в позиционировании голограммы для правильной работы прибора, так как фурье-спектры сигналов (в общем случае) имеют достаточно тонкие не осесимметричные структуры.

*Устройство реализации свертки во временной области.* Возможная схема данного устройства представлена на рис. 4.

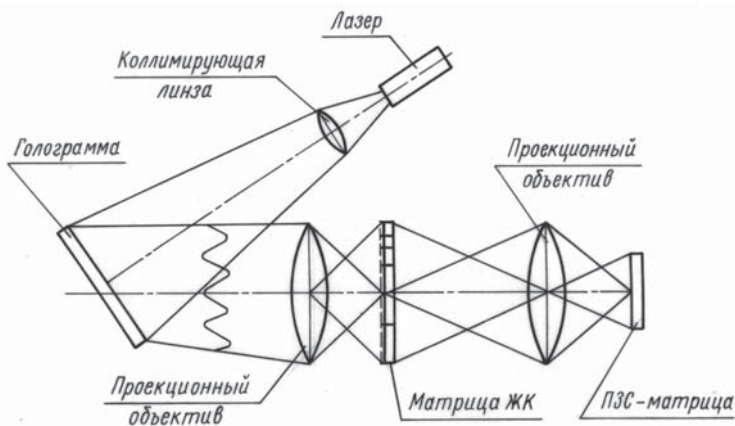


Рис. 4. Схема устройства с временной сверткой двух входных функций

С помощью лазерного излучения с голограммы восстанавливается предметная волна (на голограмме записано изображение матрицы из светлых и темных точек) – первая входная функция. Первый проекционный объектив переносит восстановленное изображение на ЖК-матрицу, на которой создается пространственное распределение коэффициента пропускания (прозрачные и непрозрачные области), переменное во времени и соответствующее второй входной функции. Картина, получившаяся на второй (по ходу излучения) подложке ЖК-матрицы соответствует перемножению элементов первой функции с элементами второй. Второй проекционный объектив переносит эту картину на ПЗС-матрицу и согласует их размеры. Сложение перемноженных элементов входных функций осуществляется в электронном виде с сигналами, снятыми с ПЗС-матрицы, по определенному алгоритму.

К достоинствам этой схемы можно отнести более низкие требования по позиционированию голограммы.

Из анализа поставленной задачи и предложенных вариантов реализации проектируемого устройства выбрана схема со сверткой в области пространственных частот, имеющая ряд значительных преимуществ (высокую скорость и простоту реализации свертки с использованием фурье-преобразующих объективов).

**Анализ функционирования устройства идентификатора ЗГ.** Для получения ЗГ со скрытым изображением используется схема, приведенная на рис. 5.

Скрытым изображением является фурье-спектр транспаранта ( $\tau_{об}(x, y)$ ), полученный с помощью фурье-преобразующего объектива (ФПО).

Транспарант  $\tau_{об}(x, y)$  представляет собой клетчатое поле из элементов  $0,1 \times 0,1$  мм размера  $1,8 \times 1,4$  мм ( $18 \times 14$  элементов), каждый

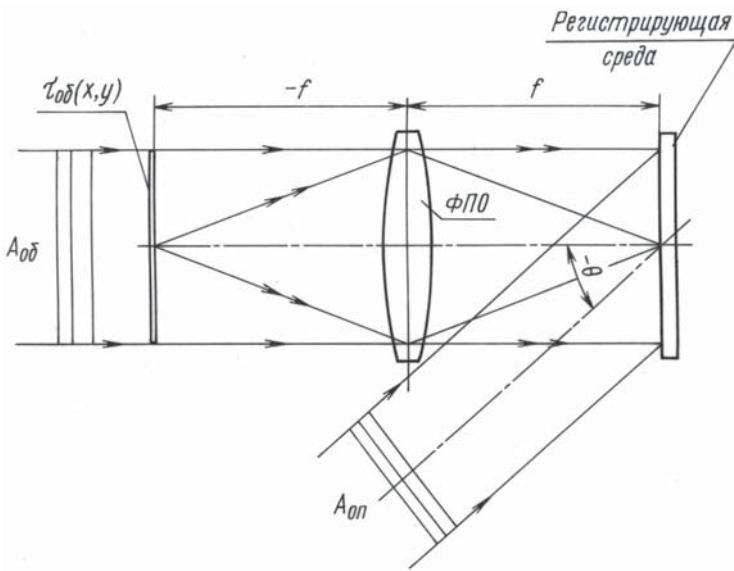


Рис. 5. Схема получения голограммы Фурье

второй элемент — не рабочий (коэффициент пропускания  $\tau_{об} = 0$ ), остальные ячейки могут иметь коэффициент пропускания  $\tau_{об}$ , равный 0 или 1 в зависимости от выбранной входной функции.

Таким образом, входной функцией является матрица, состоящая из 0 и 1, размером  $7 \times 9$ . В дальнейшем такая матрица будет рассматриваться как вектор-столбец  $[A]$  размером  $7 \times 1$ , состоящий из 9 разрядных чисел в двоичном формате (рис. 6).

Объектная и опорная волны являются плоскими.

$$\begin{aligned}
 a \quad [A]_{7 \times 1} &= \begin{bmatrix} a_{11} \\ a_{21} \\ \vdots \\ a_{n1} \\ \vdots \\ a_{71} \end{bmatrix}, \quad \text{где} \quad \forall i \in 1+9: a_{i1} = \overbrace{0(1) \ 1(0) \ \dots \ 0(1)}^9 \\
 &\{0(1) - \text{ноль или единица}\} \\
 б \quad [B]_{7 \times 7} &= \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \dots & b_{17} & \dots & b_{17} \\ b_{21} & b_{22} & \dots & b_{27} & \dots & b_{27} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ b_{71} & b_{72} & \dots & b_{77} & \dots & b_{77} \end{bmatrix}, \quad \text{где} \quad \forall y \in 1+7, i \in 1+7: b_{iy} = \overbrace{0(1) \ 1(0) \ \dots \ 0(1)}^9 \\
 в \quad ([B]_{7 \times 1})_i &= \begin{bmatrix} b_{17} \\ \vdots \\ b_{77} \\ \vdots \\ b_{27} \\ b_{21} \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

Рис. 6. Входные матрицы для голограммы (а) и ЖК-матрицы (б); вектор, выводимый одновременно на ЖК-матрицу, (в)

Полученная ЗГ будет рельефно-фазовой с теоретической максимальной дифракционной эффективностью 33,6 % (при работе на отражение).

Предполагается, что проектируемое устройство будет работать с голограммами, полученными из металлической фольги с помощью матрицы, снятой с “мастер” голограммы. При этом дифракционная эффективность голограмм будет составлять не менее 20 %.

Восстановление и декодирование скрытого изображения с ЗГ будет осуществляться устройством по схеме рис. 7.

Изображение, выводимое на ЖК-матрицу, подобно транспаранту, используемому при получении голограммы (размеры поля и элементов такие же, как и на транспаранте). Входная функция в данном случае является матрицей  $[B]$  размером  $7 \times 7$ , состоящей из 9 разрядных чисел в двоичном формате. При этом последовательно в процессе идентификации ЗГ на ЖК-матрицу выводится транспонированные строки этой входной матрицы с элементами, взятыми в обратном порядке (см. рис. 6).

На ФПЗС-матрице регистрируется освещенность, численно равная свертке функции, записанной на голограмме, и функции, выведенной на ЖК-матрицу. Размеры элемента изображения на ПЗС и на ЖК соотносятся как фокусные расстояния первого и второго фурие-преобразующих объективов. Разрядность чисел на ПЗС состав-

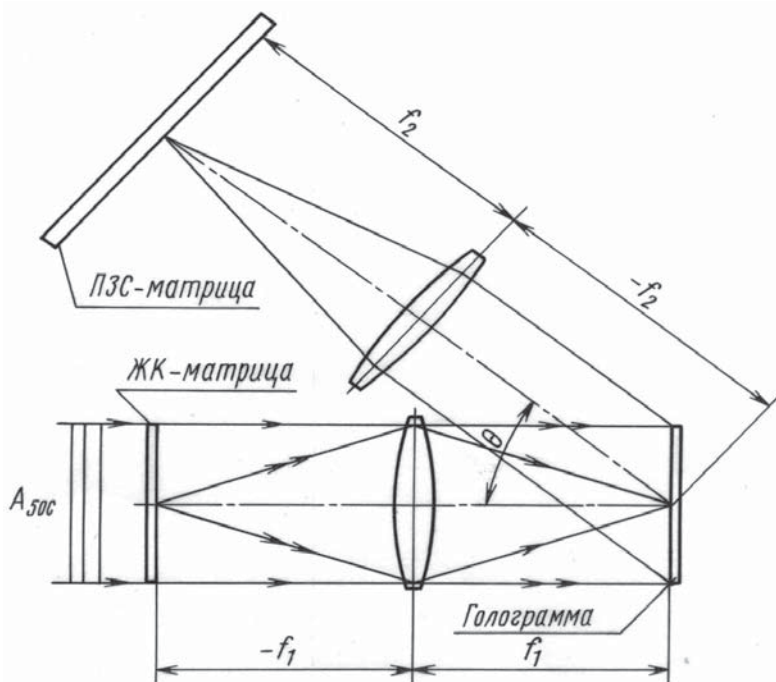


Рис. 7. Схема восстановления скрытого изображения с ЗГ

вляем  $2n - 1$ , где  $n$  — разрядность входного сигнала (максимальная), т.е. 17. Требуемый динамический диапазон ПЗС не менее 17 дБ. При аналогово-цифровом преобразовании считанного с ПЗС сигнала его можно трактовать как произведение чисел в двоичном формате, полученное в смешанном формате (без переноса единиц между разрядами).

После фурье-преобразования восстановленного волнового фронта на приемнике, количество элементов которого должно быть не менее 34, регистрируется 7-я строка полученного вектора, которая соответствует скалярному произведению “вектора голограммы” и “вектора ЖК-матрицы”:

$$\begin{bmatrix} b_{i7} \\ \vdots \\ b_{ij} \\ \vdots \\ b_{i2} \\ b_{i1} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} a_{11} \\ a_{12} \\ \vdots \\ a_{1j} \\ \vdots \\ a_{17} \end{bmatrix} = \begin{matrix} a_{11}b_{17} & 0 & 0 & 0 \\ a_{12}b_{i7} & a_{11}b_{i6} & \vdots & 0 \\ \vdots & a_{12}b_{i6} & 0 & \vdots \\ a_{16}b_{i7} & \vdots & a_{11}b_{i2} & 0 \\ a_{17}b_{i7} & a_{16}b_{i6} & a_{12}b_{i2} & a_{11}b_{i1} \\ 0 & a_{17}b_{i6} & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & a_{15}b_{i2} & a_{14}b_{i1} \\ 0 & 0 & a_{16}b_{i2} & a_{15}b_{i1} \\ 0 & 0 & a_{17}b_{i2} & a_{16}b_{i1} \\ 0 & 0 & 0 & a_{17}b_{i1} \end{matrix} + \dots + \begin{matrix} a_{13}b_{i2} & a_{12}b_{i1} \\ \vdots & \vdots \\ a_{15}b_{i2} & a_{14}b_{i1} \\ a_{16}b_{i2} & a_{15}b_{i1} \\ a_{17}b_{i2} & a_{16}b_{i1} \\ 0 & a_{17}b_{i1} \end{matrix} =$$

$$\begin{matrix} a_{11}b_{17} \\ a_{12}b_{i7} + a_{11}b_{i6} \\ \vdots \\ \vdots \\ a_{17}b_{i7} + a_{16}b_{i6} + a_{15}b_{i5} + \dots + a_{12}b_{i2} + a_{11}b_{i1} \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ a_{17}b_{i2} + a_{16}b_{i1} \\ a_{17}b_{i1} \end{matrix}$$

7-я строка:  $\Rightarrow a_{17}b_{i7} + a_{16}b_{i6} + \dots + a_{12}b_{i2} + a_{11}b_{i1} = [A]_{7 \times 1} \cdot ([B]_{7 \times 1})_i$

После регистрации на ПЗС и передачи сигнала в электронный блок на ЖК выводится следующий вектор из входной матрицы ЖК-модулятора.

В результате после семи прогонов в электронный блок будет передан сигнал, соответствующий скалярному произведению “входного вектора голограммы” и “входной матрицы ЖК-модулятора”.



## Анализ прохождения оптического сигнала через оптическую систему.

Получение голограммы Фурье транспаранта: а) Пропускание транспаранта  $\tau_{об}(x, y)$  при выбранных значениях “входной функции транспаранта” (двоичных чисел):

$$\tau_{об}(x, y) = \tau_{об0} \sum_{k=-N}^N \sum_{n=-M}^M \left( a_{n+M, k+N} \operatorname{rect} \left( \frac{x + 2ak}{a}, \frac{y + 2an}{a} \right) \right),$$

где  $\tau_{об0}$  — максимальное пропускание транспаранта (объекта) ( $\tau_{об0} \approx 1$ ),  $a_{i,j}$  — элементы матрицы “входной функции транспаранта” размера  $(2N + 1) \times (2M + 1) = 9 \times 7$ , строки которой являются выбранными двоичными числами,  $a$  — размер ячейки транспаранта;

б) На транспарант падает нормально плоская монохроматическая волна с амплитудой  $a_0$ , тогда после транспаранта волна имеет вид

$$A_{об}(x, y) = a_0 \tau_{об}(x, y);$$

в) Спектр пространственных частот волны после транспаранта равен

$$\begin{aligned} \tilde{A}_{об}(\nu_x, \nu_y) &= F_{x,y} \{ A_{об}(x, y) \} = \\ &= a_0 \tau_{об0} F_{x,y} \left\{ \sum_{k=-N}^N \sum_{n=-M}^M \left( a_{n+M, k+N} \operatorname{rect} \left( \frac{x - 2ak}{a}, \frac{y - 2an}{a} \right) \right) \right\} = \\ &= a_0 \tau_{об0} a^2 \operatorname{sinc}(\pi a \nu_x, \pi a \nu_y) \times \\ &\times \sum_{k=-N}^N \sum_{n=-M}^m (a_{n+M, k+N} \exp[-i4\pi a (\nu_x k + \nu_y n)]). \end{aligned}$$

Очевидно, что с ростом пространственной частоты амплитуды уменьшаются и слабо влияют на форму изображения, следовательно, допустима фильтрация высоких частот зрачком ФПО.

Принимаем, что пропускаемая объективом полоса пространственных частот для правильной дальнейшей обработки сигнала должна быть не менее ширины модулирующей функции  $\operatorname{sinc}(\pi a \nu_x, \pi a \nu_y)$  по второму нулю (модуль отношения первого максимума модулирующей функции к центральному равен 0,212). Таким образом, при круглом входном зрачке фурье-преобразующего объектива и размере элементов объекта  $a = 0,1$  мм требуемая пропускаемая полоса пространственных частот составит

$$\Delta \nu_{\max} = \Delta \nu_r = \Delta \nu_x \sqrt{2} = 2 \cdot 2 \cdot a^{-1} \sqrt{2} \approx 57 \text{ [мм}^{-1}\text{]}.$$

Функция зрачка ФПО (в безаберрационном приближении) имеет вид

$$P(\xi, \eta) = \text{circ} \left( \sqrt{\xi^2 + \eta^2} / (0,5D) \right),$$

где  $D$  — диаметр входного зрачка объектива.

Тогда, когерентная передаточная функция ФПО

$$\tilde{h}_{\text{ФПО1}}(\nu_x, \nu_y) = P(-\lambda p' \nu_x, -\lambda p' \nu_y) = \text{circ} \left( \lambda p' \sqrt{\nu_x^2 + \nu_y^2} / (0,5D) \right),$$

где  $p'$  — расстояние от выходного зрачка до плоскости регистрации изображения.

Спектр пространственных частот волны после объектива можно представить как

$$\tilde{A}'_{\text{об}}(\nu_x, \nu_y) = \tilde{A}_{\text{об}}(\nu_x, \nu_y) \cdot \tilde{h}_{\text{ФПО1}}(\nu_x, \nu_y);$$

г) В плоскости регистрирующей среды, расположенной в задней фокальной плоскости ФПО, амплитуда волны имеет вид

$$A'_{\text{об}}(x', y') = \frac{\tau_a^{\text{ФПО1}}}{i \lambda f'_{\text{ФПО1}}} \tilde{A}'_{\text{об}}(\nu_x, \nu_y) = u_{\text{об}}(x', y') e^{-i \frac{\pi}{2}},$$

где  $\nu_x = x' / (\lambda f'_{\text{ФПО1}})$  и  $\nu_y = y' / (\lambda f'_{\text{ФПО1}})$ ;  $\tau_a^{\text{ФПО1}}$  — амплитудный коэффициент пропускания объектива;

$$u_{\text{об}}(x', y') = \frac{\tau_a^{\text{ФПО1}}}{\lambda f'_{\text{ФПО1}}} \tilde{A}_{\text{об}}(\nu_x, \nu_y) —$$

действительная амплитуда объектной волны в плоскости регистрирующей среды;

д) Интенсивность суммарной волны, полученной при интерференции объектной и опорной волн в плоскости регистрирующей среды, составляет

$$I_{\Sigma}(x', y') = |A'_{\text{об}}(x', y') + A_{\text{оп}}(x', y')|^2,$$

где  $A_{\text{оп}}(x', y')$  — амплитуда плоской опорной волны, равная

$$A_{\text{оп}}(x', y') = a_1 e^{ikx \sin \theta} \cdot 1(x', y')$$

(здесь  $k$  — волновое число,  $\theta$  — угол падения опорной волны на плоскость регистрирующей среды);

$$\begin{aligned} I_{\Sigma}(x', y') &= |A'_{\text{об}}(x', y')|^2 + \\ &+ |A_{\text{оп}}(x', y')|^2 + A'^*_{\text{об}}(x', y') A_{\text{оп}}(x', y') + A^*_{\text{оп}}(x', y') A'_{\text{об}}(x', y') = \\ &= [u_{\text{об}}^2(x', y') + a_1^2] + 2a_1 u_{\text{об}}(x', y') \cos \left[ \frac{\pi}{2} + kx \sin \theta \right]; \end{aligned}$$

е) Коэффициент отражения полученной рельефно-фазовой голограммы имеет вид

$$\rho_{\text{гол}}(x', y') = e^{iK I_{\Sigma}(x', y')} = e^{iK [u_{06}(x', y')^2 + a_1^2]} e^{iK 2a_1 u_{06}(x', y') \cos[kx \sin \theta + \frac{\pi}{2}]},$$

где  $K$  — коэффициент, зависящий от материала, на котором получают голограмму, и от экспозиции при ее получении.

Зависимость (упрощенного вида) коэффициента отражения голограммы по координатам можно получить, используя разложение экспоненты в ряд и рассматривая только 0 и  $\pm 1$  порядки дифракции.

При  $a_1 > u_{06}(x', y')$  (данное условие чаще всего встречается на практике) имеем

$$\begin{aligned} \rho_{\text{гол}}(x', y') &= e^{iK I_{\Sigma}(x', y')} = 1 + iK I_{\Sigma}(x', y') = \\ &= 1 + iK a_1^2 - iK 2a_1 u_{06}(x', y') \sin[kx \sin \theta] = \\ &= \rho_0 - iK 2a_1 u_{06}(x', y') \sin[kx \sin \theta], \end{aligned}$$

где  $\rho_0(x', y') = 1 + iK a_1^2$  — коэффициент отражения для волны нулевого порядка дифракции.

*Восстановление изображения с голограммы:*

а) При восстановлении амплитуда референтной волны в плоскости голограммы равна

$$A'_{\text{реф}}(x', y') = \frac{\tau_a^{\Phi \text{ПО}_1}}{i \lambda f'_{\Phi \text{ПО}_1}} \tilde{A}_{\text{реф}}^{\text{ЖК}}(\nu_x, \nu_y),$$

где  $\tilde{A}_{\text{реф}}^{\text{ЖК}}(\nu_x, \nu_y)$  — соответствует вектору-столбцу из двоичных чисел,

$$\begin{aligned} \tilde{A}_{\text{реф}}^{\text{ЖК}}(\nu_x, \nu_y) &= F_{x,y} \{ A_{\text{реф}}^{\text{ЖК}}(x, y) \} = a_0 \tau_{\text{ЖК}_0} F_{x,y} \{ \tau_{\text{реф}}^{\text{ЖК}}(x, y) \} = \\ &= a_0 \tau_{\text{ЖК}_0} F_{x,y} \left\{ \sum_{k=-N}^N \sum_{n=-M}^M \left( b_{n+M, k+N} \text{rect} \left( \frac{x-2ak}{a}, \frac{y-2an}{a} \right) \right) \right\} = \\ &= a_0 \tau_{\text{ЖК}_0} a^2 \text{sinc}(\pi a \nu_x, \pi a \nu_y) \times \\ &\quad \times \sum_{k=-N}^N \sum_{n=-M}^M \left( b_{n+M, k+N} \exp[-i4\pi a(\nu_x k + \nu_y n)] \right), \end{aligned}$$

здесь  $\tau_{\text{ЖК}_0}$  — максимальный коэффициент пропускания ЖК-матрицы, считаем, что минимальный коэффициент пропускания ЖК-матрицы равен 0;

б) Амплитуду отраженной от голограммы волны можно представить как

$$A_{\text{рез}}(x', y') = A'_{\text{реф}}(x', y') \rho_{\text{гол}}(x', y').$$

Спектр пространственных частот отраженной от голограммы волны имеет вид

$$\begin{aligned} \tilde{A}_{\text{рез}}(\nu_x, \nu_y) &= F\{A_{\text{рез}}(x', y')\} = F_{x', y'}\{A'_{\text{реф}}(x', y')\} \otimes F_{x', y'}\{\rho_{\text{гол}}(x', y')\} = \\ &= \frac{\tau_a^{\Phi_{\text{ПО1}}}}{i\lambda f'_{\Phi_{\text{ПО1}}}} F\left\{\tilde{A}_{\text{реф}}^{\text{ЖК}}(\nu_x, \nu_y)\right\} \otimes F\{\rho_0\} + \\ &+ \frac{\tau_a^{\Phi_{\text{ПО1}}}}{i\lambda f'_{\Phi_{\text{ПО1}}}} F\left\{\tilde{A}_{\text{реф}}^{\text{ЖК}}(\nu_x, \nu_y)\right\} \otimes F\{-iK2a_1u_{06}(x', y') \sin(k \sin \theta)\}. \end{aligned}$$

Первое слагаемое дает волну нулевого порядка, эта волна распространяется по нормали к плоскости голограммы.

Второе слагаемое дает дифракционные пучки первого порядка

$$\begin{aligned} &\frac{\tau_a^{\Phi_{\text{ПО1}}}}{i\lambda f'_{\Phi_{\text{ПО1}}}} F\left\{\tilde{A}'_{06}(\nu_x, \nu_y)\right\} \otimes \\ &\quad \otimes F\{-iK2a_1u_{06}(x', y') \sin(k \sin(\theta))\} = \\ &= \frac{\tau_a^{\Phi_{\text{ПО1}}}}{i\lambda f'_{\Phi_{\text{ПО1}}}} \left[A_{\text{реф}}^{\text{ЖК}}(x, y) \otimes F\left\{\tilde{h}_{\Phi_{\text{ПО1}}}(\nu_x, \nu_y)\right\}\right] \otimes \\ &\quad - iF\{2a_1u_{06}(x', y') \sin(k \sin(\theta))\} = \\ &= -\frac{\tau_a^{\Phi_{\text{ПО1}}}}{\lambda f'_{\Phi_{\text{ПО1}}}} \left[A_{\text{реф}}^{\text{ЖК}}(x, y) \otimes F\left\{\tilde{h}_{\Phi_{\text{ПО1}}}(\nu_x, \nu_y)\right\}\right] \otimes \\ &\quad \otimes F\left\{A'_{06}^*(x', y') A_{\text{оп}}(x', y')\right\} - \\ &\quad - \frac{\tau_a^{\Phi_{\text{ПО1}}}}{\lambda f'_{\Phi_{\text{ПО1}}}} \left[A_{\text{реф}}^{\text{ЖК}}(x, y) \otimes F\left\{\tilde{h}_{\Phi_{\text{ПО1}}}(\nu_x, \nu_y)\right\}\right] \otimes \\ &\quad \otimes F\{A_{\text{оп}}^*(x', y') A'_{06}(x', y')\} = \\ &= \left(\frac{\tau_a^{\Phi_{\text{ПО1}}}}{\lambda f'_{\Phi_{\text{ПО1}}}}\right)^2 a_1 e^{i(kx \sin \theta - \frac{\pi}{2})} \left[A_{\text{реф}}^{\text{ЖК}}(x, y) \otimes F\left\{\tilde{h}_{\Phi_{\text{ПО1}}}(\nu_x, \nu_y)\right\}\right] \otimes \\ &\quad \otimes \left[A_{06}(x, y) \otimes F\left\{\tilde{h}_{\Phi_{\text{ПО1}}}(\nu_x, \nu_y)\right\}\right] + \\ &+ \left(\frac{\tau_a^{\Phi_{\text{ПО1}}}}{\lambda f'_{\Phi_{\text{ПО1}}}}\right)^2 a_1 e^{-i(kx \sin \theta - \frac{\pi}{2})} \left[A_{\text{реф}}^{\text{ЖК}}(x, y) \otimes F\left\{\tilde{h}_{\Phi_{\text{ПО1}}}(\nu_x, \nu_y)\right\}\right] \otimes \\ &\quad \otimes \left[A_{06}(x, y) \otimes F\left\{\tilde{h}_{\Phi_{\text{ПО1}}}(\nu_x, \nu_y)\right\}\right]. \end{aligned}$$

Пучки распространяются под углами  $\pm\theta$  относительно нормали к голограмме.

Далее будем рассматривать только волну, идущую в  $+1$  порядок, так как приемная ветвь устройства идентификации ФПО работает только с ней;

в) В задней фокальной плоскости второго ФПО располагается матричный фотоприемник излучения (матрица ФПЗС).

Амплитуду восстановленной с голограммы волны после второго фурье-преобразующего объектива можно записать как

$$\begin{aligned}
 A_{\text{вос}}(x'', y'') &= \frac{\tau_a^{\text{ФПО}_2}}{i\lambda f'_{\text{ФПО}_2}} \tilde{A}_{\text{рез}+1}(\nu_x, \nu_y) = \\
 &= \frac{a_1 \tau_a^{\text{ФПО}_2}}{\lambda f'_{\text{ФПО}_2}} \left( \frac{\tau_a^{\text{ФПО}_1}}{\lambda f'_{\text{ФПО}_1}} \right)^2 \left[ F \left\{ \tilde{h}_{\text{ФПО}_1}(\nu_x, \nu_y) \right\} \otimes F \left\{ \tilde{h}_{\text{ФПО}_1}(\nu_x, \nu_y) \right\} \right] \otimes \\
 &\quad \otimes \left[ A_{\text{реф}}^{\text{ЖК}}(x'', y'') \otimes A_{\text{об}}(x'', y'') \right] e^{-i(kx'' \sin \theta)} = \\
 &= \frac{a_1 \tau_a^{\text{ФПО}_2}}{\lambda f'_{\text{ФПО}_2}} \left( \frac{\tau_a^{\text{ФПО}_1}}{\lambda f'_{\text{ФПО}_1}} \right)^2 F \left\{ \tilde{h}_{\text{ФПО}_1}(\nu_x, \nu_y) \right\}^2 \otimes \\
 &\quad \otimes \left[ A_{\text{реф}}^{\text{ЖК}}(x'', y'') \otimes A_{\text{об}}(x'', y'') \right] e^{-i(kx'' \sin \theta)},
 \end{aligned}$$

где  $\nu_x = x''/(\lambda f'_{\text{ФПО}_2})$  и  $\nu_y = y''/(\lambda f'_{\text{ФПО}_2})$ .

Таким образом, из сказанного выше следует, что на матрице ФПЗС действительно получится двумерная свертка двух сигналов  $A_{\text{об}}(x'', y'')$  и  $A_{\text{реф}}^{\text{ЖК}}(x'', y'')$ , при этом полученное изображение несколько размыто из-за свертки с функцией входного зрачка первого фурье-преобразующего объектива;

г) При считывании с матрицы ФПЗС определенных строк в электронный блок обработки сигнала (компьютер) считанный сигнал будет пропорционален освещенности, созданной в плоскости ФПЗС, т.е. квадрату амплитуды волны.

Это должно учитываться программным обеспечением для дополнительной криптографической обработки полученного сигнала, которая может проводиться по какому-либо криптографическому алгоритму.

**Выводы.** Для выбранной принципиальной оптической схемы устройства были проведены габаритный, светоэнергетический и абберационные расчеты, позволяющие утверждать принципиальную возможность создания данного устройства на существующей элементной базе. Направлениями дальнейших исследований являются следующие вопросы: влияние ошибок позиционирования ЗГ при идентификации и их устранение, выбор криптографического алгоритма и разработка программного обеспечения для криптографической обработки.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Г а л ь п е р и н А. Д. Голографическое устройство для воспроизведения кодирующих элементов. Патент Российской Федерации № 2110411 от 10.05.98 г.
2. J o h n E. Wreede at al. Encoded hologram for producing a machine readable and a human readable image, Patent USA No 5,499,116 of Mar. 12, 1996.
3. J a v i d i B., Z h a n g G., L i J. Experimental demonstration of the random phase encoding technique for image encryption and security verification. Opt. Eng., 1996., V. 35, N 9, p. 2506–2512.
4. J a v i d i B., S e r g e n t A., Z h a n g G., G u i b e r t L. Fault tolerance properties of a double phase encoding encryption technique. Opt. Eng. – 1997. – V. 36, № 4. – P. 992–998.
5. R e f r e g i e r P., J a v i d i B. Optical image encryption based on input plane and Fourier plane random encoding. Opt. Lett. – 1995. – V. 20. – P. 767–769.
6. S o n g s a n L a i. Security holograms using an encoded reference wave, Optical Engineering, vol. 35, No 9, September 1996.
7. Б о б р и н е в В. И., Г у л а н я н Э. Х. Голограммы с протяженным опорным источником // Квантовая электроника. – 1971. – Вып. 4.
8. А р р а т у н а Р. Оптические вычисления. – М.: Мир, 1993.

Статья поступила в редакцию 26.01.2005

Александр Юрьевич Павлов родился в 1983 г. Студент МГТУ им. Н.Э. Баумана. Специализируется в области оптико-электронной обработки информации и голографии.

A.Yu. Pavlov (b. 1983) – student of the Bauman Moscow State Technical University. Specializes in the field of optoelectronic data processing and holography.



Сергей Борисович Одинокоев родился в 1950 г., окончил в 1973 г. МВТУ им. Н.Э.Баумана. Канд. техн. наук, доцент кафедры “Лазерные и оптико-электронные системы” МГТУ им. Н.Э.Баумана. Автор около 130 научных работ в области оптико-электронной обработки информации и голографии.

S.B. Odinkov (b. 1950) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1973. Ph. D. (Eng.), assoc. professor of “Laser and Optical and Electronic Systems” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of about 130 publications in the field of optoelectronic data processing and holography.