

Ероховец В. К., ведущий научный сотрудник (ОИПИ НАН Беларуси);  
Ткаченко В. В., заведующий лабораторией (ОИПИ НАН Беларуси)

## ГОЛОГРАФИЧЕСКИЙ ЗАЩИТНЫЙ ЭЛЕМЕНТ С ОБРАЩЕНИЕМ ВОЛНОВОГО ФРОНТА

В статье рассмотрен один из подходов последовательного воспроизведения голографических записей с обращенным волновым фронтом. Дано общее математическое описание информационной модели способа. Предложены варианты для двухкратного повышения информационных свойств при защите документов.

The way of holographic records consecutive reproduction is developed. The energy of zero order bunches on each previous cycle of the reading for the reproduction of this or other holograms on the subsequent cycles is used. The general mathematical description of information and power model of the method is given.

**Введение.** Подделка документов и ценных бумаг возникла давно и неуклонно совершенствуется вместе с развитием технологии их создания. Поэтому в наш век подделок и фальшивок очень важно установить подлинность документа, ценной бумаги, предмета и продукта.

Установление подлинности документов сложный и трудоемкий процесс, и основывается он на сравнении с признаками защиты, которые выступают в качестве эталонов. В этом процессе различают *оперативный и углубленный контроль* подлинности [1, с. 25]. *Углубленный контроль* подлинности ведется специальными экспертами с использованием признаков распознавания подлинности. На практике широко применяется *оперативный контроль*, который осуществляется путем анализа определенных средств защиты. Подделка средств защиты выполняется настолько качественно, что часто отличить подделку от оригинала не представляется возможным. Чтобы повысить точность идентификации подлинности того или иного документа, используют большое количество разнородных признаков (от 10 до 30) [2]. Непрерывная подделка применяемых средств защиты подлинности ставит задачу разработки новых, более совершенных признаков, и в результате со временем количество используемых признаков в оперативном контроле непрерывно возрастает, а сам процесс идентификации подлинности усложняется. Эта ситуация накладывает свой отпечаток на количественный и качественный набор признаков распознавания, методику их идентификации, аппаратное оформление приборов контроля подлинности и их программного обеспечения.

Набор признаков, по которым устанавливается подлинность исследуемого документа, формирует информационное поле. В качестве признаков подлинности применяются самые разнообразные свойства печатной продукции, реализуемые на специальных материалах с использованием голограмм, переменного оптического эффекта, УФ-люминесценции, ИК-люминесценции и др.

Если установлено  $N$  признаков подлинности, то результирующая вероятность того, что данный документ подлинный, может быть определена следующей формулой [2]:

$$W = \log_2 \prod_{i=1}^N 2^{K_i p_i}. \quad (1)$$

где  $K_i$  и  $p_i$  — соответственно весовой коэффициент и вероятность присутствия или отсутствия  $i$ -го признака. Вероятность того, что данный документ является подлинным, определяется условием нормировки, т. е.

$$A \sum_{i=1}^n K_i^p = 1,$$

где  $A$  — нормировочный коэффициент. Очевидно, что для однородных признаков  $A = 1/N$ .

Следует различать простые и сложные признаки распознавания подлинности. Простые формируются только с помощью какой-то одной технологической операции или путем выполнения определенного набора измерительных операций, а сложные признаки формируются целой совокупностью выполнения определенных технологических, аппаратных, методических и измерительных операций. Для простых признаков весовой коэффициент равен единице, а для сложных признаков весовой коэффициент может значительно отличаться от единицы.

Голографическая защита визуальной информации считается на сегодняшний день одной из самых устойчивых от подделки. Плотность записи идентифицируемой информации в голографическом процессе намного превосходит все остальные способы хранения данных. Поэтому подделать в точности голографические изображения практически невозможно. Голографическая защита хороша, что является комплексной по своей сути. В одной голограмме могут сочетаться различные степени защиты, каждая из которых предназначена для своего уровня идентификации: от визуального восприятия на уровне потребителя товара до

эксперта, применяющего специальную аппаратуру с использованием методов амплитудного и фазового кодирования скрытых аналоговых и компьютерно-синтезированных голограмм.

Наиболее распространенными технологиями создания защищенных голограмм являются:

1. Аналоговые оптические способы записи на голографическом столе (2D/3D голограммы, голограммы сфокусированного изображения, радужные голограммы, Фурье-голограммы, многорадужные голограммы, стереограммы, муар, скрытые замаскированные изображения, микротекст и др.).

2. Цифровые способы компьютерного синтеза с использованием голографических принтеров, а также лазерных и/или электронно-лучевых растровых генераторов (2D/3D синтезированные голограммы, микротекст, нумерация и персонализация, деметаллизация).

В первом приближении по степени защиты голографических марок разработанные методы проработаны в следующем порядке:

1. Голограмма плоского изображения, записанная на голографическом столе.

2. Голограмма 2D/3D, записанная на голографическом столе, имеющая передний план в плоскости и задний план на заданном расстоянии.

3. Голограмма плоского изображения, записанная на голографическом принтере (2D/3D голограмма).

4. Голограмма плоского изображения, записанная на голографическом принтере, содержащем микротекст.

5. 2D/3D голограмма со скрытым изображением. Скрытое изображение можно считать, используя специальное устройство.

6. 2D/3D голограмма с несколькими скрытыми изображениями, локализованными в разных плоскостях и считываемыми специальным прибором.

7. 2D/3D голограмма со скрытым изображением, записанным в точке, либо в части видимого изображения. Для того чтобы увидеть такое изображение, необходимо знать его место локализации и иметь специальный прибор, отличающийся от идентификатора скрытого изображения.

8. Голограмма, записанная на голографическом принтере по dot matrix технологии со стереоскопическим объемным изображением.

9. Голограмма синтезированного объемного изображения, записанная на голографическом столе путем синтеза из плоских изображений.

10. Голограмма синтезированного объемного изображения, содержащая специальные ракурсы.

11. Голограмма, состоящая из плоского изображения, записанная по dot matrix технологии, и объемного изображения, записанного на голографическом столе.

12. Голограмма, состоящая из плоского изображения, записанная по dot matrix технологии, и объемного изображения, записанного на голографическом столе со скрытым изображением.

13. Голограмма, записанная на голографическом принтере по «dot-matrix» технологии со стереоскопическим объемным изображением, со скрытым изображением в точке, записанным на голографическом столе.

Таким образом, эффективная система защитных технологий предполагает [1–8] наложение способов и технических решений с комбинированием видимых, скрытых и машиносчитываемых элементов. Одним из подходов является последовательное воспроизведение голографических записей с обращением волновым фронтом.

**Основная часть.** 1. *Информационная модель голографических записей.* При записи голограмм на фоточувствительной пластине регистрируется интерференционная картина локализованного объектного  $U_{WO}(x)$  и опорного  $U_{WR}(x)$  пучков. Пусть комплексная амплитуда объектного пучка выражается через амплитудное  $U_{WO}(x)$  и фазовое  $\psi(x)$  распределения:

$$U_{WO}(x) = u_{WO}(x) \exp[j\psi(x)] \exp(j2\pi \sum_{i=1}^n v_{WO_i} x), \quad (2)$$

где объектный пучок представлен суммой  $N$  элементарных излучателей, на которые можно дискретизировать изображение входной страницы информации, с несущей частотой.

$$v_{WO_i} = \frac{\sin \alpha_{WO_i}}{\lambda_W}. \quad (3)$$

Здесь и в последующем для упрощения анализа двумерные функции будем представлять с аргументом в одной плоскости  $xOz$ , поскольку основные выводы можно просто распространить на двумерном варианте.

Для простоты аналитических выкладок возьмем опорный пучок с плоским волновым фронтом, имеющий комплексную амплитуду

$$U_{WR}(x) = u_{WR} \exp(j2\pi v_{WR} x). \quad (4)$$

Тогда для интенсивности, регистрируемой фотопластиной, можно записать выражение

$$I(x) = (U_{WO} + U_{WR})(U_{WO} + U_{WR})^* = U_{WO}U_{WO}^* + U_{WR}U_{WR}^* + U_{WO}U_{WR}^* + U_{WR}U_{WO}^*, \quad (5)$$

или с учетом выражений (2), (4) и (5)

$$I(x) = (U_{WO} + U_{WR})(U_{WO} + U_{WR})^* = u_{WO}^2(x) + u_{WR}^2 + u_{WO}(x)u_{WR} \exp[j\psi(x)] \times \exp\left[j2\pi \left(\sum_{i=1}^N v_{WO_i} - v_{WR}\right)x\right] + u_{WO}(x)u_{WR} \times \exp[-j\psi(x)] \exp\left[j2\pi \left(v_{WR} - \sum_{i=1}^N v_{WO_i}\right)x\right]. \quad (6)$$

Положим, что при обработке фотопластины с зарегистрированной голограммой обеспечена

линейная пропорциональность между ее амплитудным коэффициентом пропускания и интенсивностью голографической интерференционной картины. Тогда при освещении данной голограммы считывающим пучком света с плоским волновым фронтом и комплексной амплитудой

$$U_R(x) = u_R \exp(j2\pi v_R x) \quad (7)$$

комплексную амплитуду света на выходе голограммы можно представить как

$$U_{\text{вых1}}(x) = I(x)U_R(x) = U_{WR}U^*_{WO}U_R + U_{WR}U^*_{WR}U_R + U_{WO}U^*_{WR}U_R + U^*_{WO}U_{WR}U_R \quad (8)$$

или с учетом выражений (6), (7) и (8)

$$\begin{aligned} U_{\text{вых1}}(x) = & u_R u_{WO}^2(x) \exp(j2\pi v_R x) + \\ & + u_R u_{WR}^2(x) \exp(j2\pi v_R x) + u_{WO}(x) u_{WR} u_R \times \\ & \times \exp[j\psi(x)] \times \exp \left[ j2\pi \left( \sum_{i=1}^N v_{WO_i} - v_{WR} + v_R \right) x \right] + \\ & + u_{WO}(x) u_{WR} u_R \exp[-j\psi(x)] \times \\ & \times \exp \left[ j2\pi \left( v_{WR} - v_R - \sum_{i=1}^N v_{WO_i} \right) x \right]. \quad (9) \end{aligned}$$

С точностью до постоянного множителя первые два слагаемых в выражении (9) умножаются на  $\exp(j2\pi v_R x)$ . Это означает, что соответствующие им составляющие распространяются от голограммы в направлении считывающего пучка. Третье слагаемое соответствует копии волнового фронта объектного пучка, четвертое слагаемое описывает составляющую, которая распространяется под еще более крутым углом относительно нормали голограммы. Учитывая реальную регистрацию голограмм на фотопластинах с конечной толщиной эмульсионного слоя, который в ряде практических случаев достаточен для подавления комплексно-сопряженного изображения, при энергетическом анализе воспроизведения голограмм последней составляющей в выражении (9) можно пренебречь.

Идея метода последовательного воспроизведения голографической информации заключается в использовании световой энергии с комплексной амплитудой двух первых слагаемых в выражении (9) на каждом предыдущем цикле считывания для воспроизведения этой же или любых других голограмм на последующих циклах.

**2. Голографическая запись с обращенным волновым фронтом.** Рассмотрим возможности способа последовательного считывания для многократного воспроизведения одной голограммы. Примером такой реализации способа с формированием двух информационных каналов является схема с оптической обратной связью на выход голограммы, когда из пучка света нулевого порядка формируется сопряженный относительно считывающего пучок света (рис. 1). Предполага-

ется, что зеркало  $Z_1$ , установленное за голограммой  $\Gamma$ , перпендикулярно пучку света нулевого порядка и отъюстировано относительно выходного зеркала  $Z_2$  лазера  $L$ . Таким образом, получается трехзеркальная лазерная система, состоящая из зеркал лазера  $Z_2$  и  $Z_3$ , между которыми находится активный элемент АЭ, и пассивного резонатора, состоящего из выходного зеркала  $Z_2$  лазера, голограммы и зеркала  $Z_1$ .

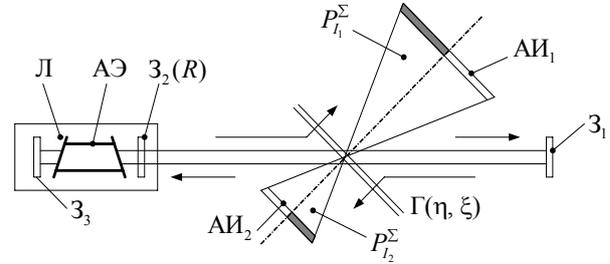


Рис. 1. Схема воспроизведения голограмм с обращенным волновым фронтом

К сожалению, технологические возможности построения такой системы чрезвычайно ограничены в силу низкой добротности реального пассивного резонатора. Из-за больших потерь в общем случае на недетерминированной голограмме использовать интерференционные эффекты в пассивном резонаторе практически не удастся. Поэтому при энергетическом анализе эффективности схемы ограничимся конечным числом отражений пучка света от зеркал  $Z_1$  и  $Z_2$ , который при дифракции на «толстой» голограмме формирует два информационных канала. Масштаб воспроизводимых изображений на рис. 1 условен и определяется оптической структурой объектного канала в схеме записи голограмм и информационных каналов в схеме воспроизведения.

Каждый раз при  $i$ -м прохождении волнового фронта через голограмму от выходного зеркала  $Z_2$  к зеркалу  $Z_1$  часть энергии мощностью

$$P_{I_1} = \eta P_R R^{i-1} (1 - \eta - \xi)^{2(i-1)} \quad (10)$$

дифрагирует в плоскость первого анализатора изображений АИ<sub>1</sub>, а при  $j$ -м прохождении в обратном направлении часть энергии мощностью

$$P_{I_2} = \eta P_R R^{j-1} (1 - \eta - \xi)^{2(j-1)} \quad (11)$$

дифрагирует в плоскость второго анализатора изображений АИ<sub>2</sub>, восстанавливая волновой фронт объектного пучка, используемого на этапе записи. Здесь  $R$  — коэффициент отражения выходного зеркала лазера, а  $\xi = \xi_0 + \xi_n + \xi_p$  — суммарный коэффициент потерь голограммы на отражение  $\xi_0$ , поглощение  $\xi_n$  и рассеяние  $\xi_p$  когерентного света. При этом эквивалентная дифракционная эффективность голограммы в

первом и втором информационных порядках соответственно оценивается выражениями:

$$\eta_{\Sigma 1} = \frac{P_{I_1}^{\Sigma}}{P_R} = \frac{\eta}{1 - R(1 - \eta - \xi)^2}; \quad (12)$$

$$\eta_{\Sigma 2} = \frac{P_{I_2}^{\Sigma}}{P_R} = \frac{\eta(1 - \eta - \xi)^2}{1 - R(1 - \eta - \xi)^2}. \quad (13)$$

Анализируя формулу (12), а также построенный по ней график (рис. 2) для различных значений  $\eta$ ,  $\xi$  и  $R$ , можно сделать вывод, что наибольшая эффективность использования описанного способа наблюдается для чисто фазовых голограмм с максимально возможным коэффициентом  $R \rightarrow 1,0$ . Множитель  $(1 - \eta - \xi)$  в числителе выражения (13) несколько уменьшает эквивалентную дифракционную эффективность второго информационного канала по сравнению с первым.

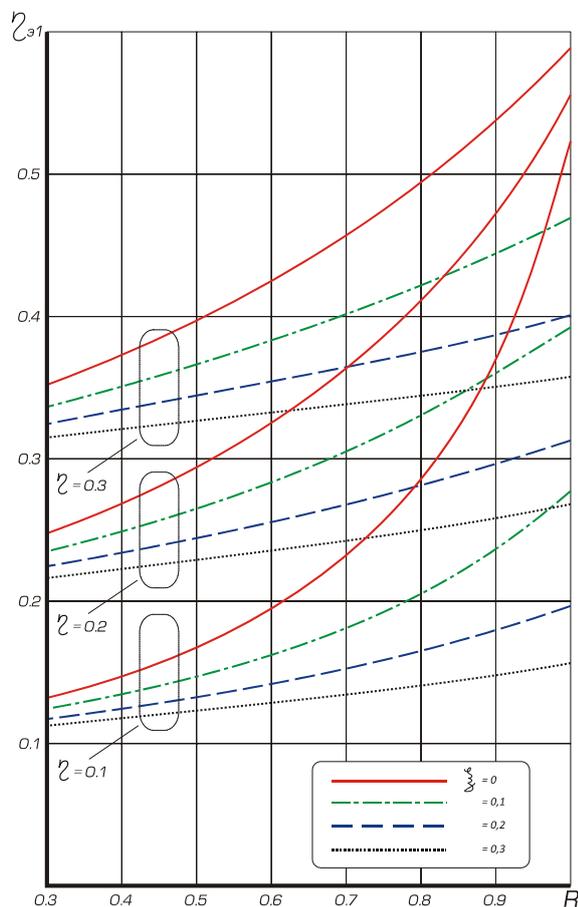


Рис. 2. Семейство графиков для определения эквивалентной дифракционной эффективности в первом информационном канале

Определяющим фактором достижения максимального использования когерентного излучения

$$K_{\text{ИКИ}} = \frac{P_{I_1}^{\Sigma} + P_{I_2}^{\Sigma}}{P_R} = \frac{\eta(1 - \eta - \xi)}{1 - R(1 - \eta - \xi)^2} \quad (14)$$

является не столько дифракционная эффективность голограммы, сколько потери в пассивном резонаторе, т. е. величина  $\xi$ .

Предельные значения  $K_{\text{ИКИ}}$  при  $R \rightarrow 1,0$  оцениваются выражениями (12)–(14). Для абсолютно фазовых голограмм ( $\xi \rightarrow 0$ ) осуществляется 100%-я дифракция лазерного света в плоскость воспроизводимых изображений с соотношением  $\eta_{\Sigma 2} / \eta_{\Sigma 1} = 1 - \eta$ .

Столь высокие значения  $K_{\text{ИКИ}}$  обусловлены повышением яркости в плоскости первого анализатора изображения в  $[1 - R(1 - \eta - \xi)]^{-1}$  раз и формированием второго информационного канала с интегральной мощностью  $P_{I_2}^{\Sigma} = P_R \eta_{\Sigma 1}$ .

Последнее обстоятельство особенно ценно для реализации вспомогательного визуального контроля при настройке электронных трактов воспроизведения в документальной памяти в процессе преобразования голографических записей в обычные микроформы или полноформатные документы, фрагментного считывания по двум информационным каналам и т. п. Подтверждение этому — создание первых образцов голографической информационной техники [5–10] с помощью данного способа.

Наличие двух каналов воспроизводимых изображений позволяет реализовать скрытые варианты идентификации, например оперативный и углубленный контроль подлинности голографических документов. При этом один из каналов используется в качестве экспресс-анализа визуально контролируемой скрытой защиты. Второй канал — для углубленной лабораторно контролируемой защиты, которая может применяться как замаскированная двойная защита.

**Заключение.** Разработан способ последовательного воспроизведения голографических записей, основанный на использовании энергии пучков нулевого порядка на каждом предыдущем цикле считывания для воспроизведения этой же или другой голограммы на последующих циклах. Дано общее математическое описание информационной и энергетической модели способа. Показана 100%-я эффективность последовательного воспроизведения голограмм с обращением волнового фронта без учета амплитудно-фазовых потерь.

### Литература

1. Коншин, А. А. Защита полиграфической продукции от фальсификации / А. А. Коншин. — М.: ООО «Синус», 2000. — 160 с.
2. Определение подлинности документов по их изображениям / И. П. Шумский [и др.] // Цифровая обработка изображений — 2001. — Вып. 5. — С. 184–191.
3. Уоллерт Г. Р. Разработка эффективной системы защиты, основанной на оптически-

перенесенных элементах / Г. Р. Уоллерт // Новости голографии. — 2001. — № 6. — С. 10–11.

4. Гориленко, А. Я. Современные методы защиты банкнот и ценных бумаг от подделки / А. Я. Гориленко, Л. С. Корочкин // Труды БГТУ. Сер. IX, Издат. дело и полиграфия. — 2002. — Вып. X. — С. 61–69.

5. Способ считывания голографической информации и устройство для его осуществления: а. с. № 647979 СССР, М. Кл.<sup>2</sup>. G11C11/42 / Н. А. Яρμοш, А. Г. Куконин, В. К. Ероховец, Д. К. Сигитов (СССР). — № 2342298/18-24; заявл. 01.04.76; опубл. 20.10.78 // Бюл. № 46.

6. Способ получения и восстановления оптических голограмм и устройство для его осуществления: пат. 2025760 РФ МКИ5 G03H1/28 / В. К. Ероховец. — № 4938314/25; заявл. 27.05.91; опубл. 30.12.94 // Бюл. № 24.

7. Устройство для воспроизведения модулей информационных массивов: а. с. № 647926. СССР, М. Кл.<sup>2</sup> G03Y1/26 G06G9/00 G11G13/04 / Н. А. Яρμοш, А. Г. Куконин, В. К. Ероховец

(СССР). — № 2322593/18-25; заявл. 30.01.76; опубл. 30.11.85 // Бюл. № 44.

8. Ероховец, В. К. Геометрический анализ идентификаторов защитных голограмм / В. К. Ероховец // Анализ цифровых изображений: сб. науч. тр. — Минск: ОИПИ НАН Беларуси, 2003. — С. 107–116.

9. Устройство для идентификации голографических марок: пат. 307 U ВУ РБ МПК<sup>7</sup> G03H1/28 / Л. В. Танин, А. С. Рубанов, В. К. Ероховец, В. А. Бурский, С. А. Рыжечкин, В. В. Маникало, П. В. Моисеенко. — № и 20000162; заявл. 20.10.2000; опубл. 02.04.2001 // Афіцыйны бюлетэнь Дзярж. пат. ведамства Рэсп. Беларусь. — 2001. — № 3. — С. 147.

10. Устройство для идентификации ценных бумаг: пат. 850 U ВУ РБ, МПК<sup>7</sup> G03H1/28 / Л. В. Танин, А. С. Рубанов, В. К. Ероховец, В. А. Бурский, С. А. Рыжечкин, В. В. Маникало, П. В. Моисеенко. — № и 2002028; заявл. 25.07.2002; опубл. 30.06.2003 // Афіцыйны бюлетэнь Дзярж. пат. ведамства Рэсп. Беларусь. — 2003. — № 2. — С. 275.

*Поступила 30.03.2010*