

# ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И МЕДИАТЕХНОЛОГИИ

---

УДК 004.9

**А. А. Борискевич<sup>1</sup>, В. К. Ероховец<sup>2</sup>, В. В. Ткаченко<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

<sup>2</sup>Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси

## **СИНТЕЗ И ВОССТАНОВЛЕНИЕ КВАНТОВАННЫХ ГОЛОГРАММ ФУРЬЕ И ФРЕНЕЛЯ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ**

Предложены модели формирования квантованных голограмм Фурье как метод защиты цифровых изображений, основанный на внедрении в голограмму секретных ключей в виде цифровых кодирующих масок, с помощью которых осуществляется дополнительная пространственная модуляция опорного или объектного пучков. Представлены варианты численного моделирования интерференционных структур с применением двумерного дискретного преобразования Фурье к изображениям объектного и опорного пучков и псевдослучайного кодирования их амплитудной и фазовой составляющих, а также модель безопорной голограммы Фурье, формируемой цифровым способом с использованием изображений объектного и комплексно-сопряженного с ним пучков, включающих амплитудную и зашифрованную фазовую составляющие. При установлении оптимального соотношения между качеством восстановленных изображений и коэффициентом сжатия информации о голограмме обеспечивается отношение сигнал/шум  $PSNR \geq 30$  дБ.

Разработана модель защитных квантованных голограмм Френеля, основанная на синтезе изображения интерференционной картины при наложении образа Френеля исходного изображения и опорного пучка с псевдослучайным амплитудно-фазовым кодированием. Ключевыми параметрами голограмм Френеля являются расстояние между исходным изображением и плоскостью голограммы, виртуальная длина волны и секретный ключ генератора фазовой маски опорного пучка. Представлена модель защищенных квантованных наложенных голограмм, основанная на синтезе безопорных голограмм Френеля для изображений, ключевыми параметрами которых являются расстояния до плоскости регистрации голограмм, и на выборе правила их объединения с безопорной голограммой Френеля кодирующей псевдослучайной фазовой маски. Метод позволяет генерировать цифровые «водяные знаки» и фоновую обстановку для голографируемых изображений с различными визуальными эффектами.

**Ключевые слова:** защита медиаданных, цифровая голография, цифровой «водяной знак», псевдослучайное кодирование.

**A. A. Boriskevich<sup>1</sup>, V. K. Erokhovets<sup>2</sup>, V. V. Tkachenko<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

<sup>2</sup>United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus

## **SYNTHESIS AND RECOVERY OF FOURIER AND FRESNEL QUANTIZED HOLOGRAMS FOR DIGITAL IMAGE**

Construct model of quantized Fourier holograms as a method of protecting digital images is proposed. The method based on inserting secret keys in the hologram. Additional spatial modulation of the reference or object beams is carried out with the key in the form of digital encoding mask. Examples of images in numerical simulation are presented for the interference structures with the use of two-dimensional discrete Fourier transform to the images of object and reference beams and pseudorandom encoding of their amplitude and phase components. Model of free-reference beam Fourier hologram is proposed. This hologram is generated with using images of the object and the complex-conjugate beams thereto, comprising encrypted amplitude and phase components. The signal-to-noise ratio  $PSNR \geq 30$  is provided when establishing the optimal ratio between hologram information compression ratio and a quality of the reconstructed image.

Protective quantized Fresnel holograms model is developed. It's based on image design of interference pattern, that come out as superposition of object beam Fresnel transformation and reference beam with random amplitude and phase coding. Key parameters are: the distance between the original image

and Fresnel hologram plane, virtual wavelength and secret key of reference beam phase mask generator. Model of multilayer free-reference beam Fresnel holograms is suggested. Its basis is synthesis of free-reference beam Fresnel holograms for images, secret keys to which are the distance from the plane of hologram recording as well as choosing the rules of their association with free-reference beam Fresnel hologram of pseudo-random phase encoding mask. The method allows to generate digital watermark and background setting for holographically images with different visual effects.

**Key words:** media data security, protective holograms, digital watermark, pseudorandom encoding matrix, digital holography.

**Введение.** Голографические технологии широко используются в защите товаров, пластиковых карт и бумажных документов (ценных бумаг, акцизных марок, упаковок) [1, 2]. Эффективность голографической защиты от контрафакта определяется тем, что она является комплексной по своей сути: в одной голограмме могут сочетаться различные способы защиты – как оптические [3], так и логические или цифровые [4–6]. В то же время цифровая трансформация различных сфер деятельности человека, внедрение электронного документооборота актуализирует разработку алгоритмов синтеза цифровых защитных голограмм с целью управления уровнем защиты и снижения себестоимости защиты продукции, что в свою очередь определяет в целом развитие голографических методов как одно из перспективных направлений совершенствования защиты документов и медиаданных в современных инфокоммуникационных технологиях [7–9].

Целью исследования является разработка цифровых моделей квантованных защищенных голограмм Фурье и Френеля с визуальными эффектами. Полутонное изображение как носитель визуальной информации обладает информационной избыточностью (кодовой, корреляционной и психовизуальной), которая может служить резервом повышения помехоустойчивости голографической формы представления цифрового изображения. Голографические методы позволяют синтезировать и восстанавливать цифровые голограммы простых изображений, мультиплексные голограммы для нескольких изображений, в том числе многослойных объектов с художественными эффектами и 3D-объектов. Тем самым эти методы становятся инструментом расширения возможностей компьютерной криптографии и стеганографии для управления защитой данных.

Моделирование разработанных алгоритмов синтеза и восстановления квантованных голограмм проведено в среде программирования Matlab.

**Основная часть.** В зависимости от взаимного положения плоскостей изображения и голограммы, а также наличия оптических элементов между ними связь амплитудно-фазового распределения интенсивности световой волны в плоскости голограммы и соответствующего распре-

деления непосредственно за объектом описывается преобразованиями Френеля или Фурье.

**Модели голограмм Фурье.** Построение цифровой модели квантованной фазовой голограммы с защитой основано на амплитудном и фазовом псевдослучайном кодировании исходного объектного

$$I_O = (I_O(m, n) | m = \overline{1, M}, n = \overline{1, N})$$

и опорного

$$R_\theta = (R_\theta(p, q) = |R(p, q)| \exp(j\theta_R(p, q)) | p = \overline{1, M}, q = \overline{1, N})$$

пучков, на формировании интерференционной фазовой структуры Фурье-голограммы  $H_{FPh}$  и установлении соотношения между качеством голографического изображения и количеством итераций при его восстановлении:

$$H_{FPh} = (H_{FPh}(p, q) | p = \overline{1, M}, q = \overline{1, N}), \quad (1)$$

где  $H_{FPh}(p, q)$  – двоичные значения яркостей пикселей в изображении квантованной фазовой Фурье-голограммы в диапазоне  $[0; 2\pi]$ :

$$H_{FPh}(p, q) = Q(\varphi_O(p, q) - \theta_R(p, q));$$

$Q$  – оператор квантования;  $\theta_R(p, q) \in (-\pi, \pi)$  – значение псевдослучайной равномерно распределенной фазы опорного пучка, изменяющейся в диапазоне  $(-\pi; \pi)$ ;  $\varphi_O(p, q)$  – значение фазы Фурье-образа зашифрованного объектного пучка  $F_O(p, q) = |F_O(p, q)| \exp(j\varphi_O(p, q))$ , расширенного до размеров  $2M \times 2N$ .

Процесс итерационного восстановления изображения (объектного пучка  $I_O$ ) из квантованной фазовой Фурье-голограммы  $H_{FPh}$  (1) определяется с помощью параметров опорного пучка  $R_\theta$  и соотношения

$$I_k(m, n) = D_{Ks}(IFT_k(|FT_{k-1}(I_{k-1}(m, n))| \exp(\varphi_O(p, q))))),$$

где  $I_{k-1}(m, n)$  – значение восстановленного изображения из голограммы размером  $2M \times 2N$  на  $(k-1)$ -й итерации:

$$I_{k-1}(m, n) = Z(IFT_{k-1}(|E_{k-1}(p, q)| \exp(Q^{-1}(H_{FPh}(p, q) + \theta_R(p, q)))));$$

$Z(\cdot)$  – символ оператора дополнения нулями исходного и восстанавливаемого изображений при синтезе и восстановлении голограммы;  $FT(\cdot)$  и  $IFT(\cdot)$  – символы прямого и обратного двумерного дискретного Фурье-преобразования;  $D_{K_s}(\cdot)$  – символ оператора дешифрирования голографического изображения, использующий на последней  $k$ -й итерации секретный ключ  $K_s$ , от которого зависят условия генерации знакопеременной псевдослучайной маски;  $|E_0(p, q)| \exp(j\varphi_0(p, q))$  – комплексное значение Фурье-спектра на первой итерации с единичным амплитудным спектром  $E_0$ .

Без знания секретного ключа синтеза фазы опорного пучка восстановление исходного изображения невозможно. Пространство секретных ключей для данного алгоритма определяется соотношением  $2^{MN(1+L)}$ , где  $L$  – длина кодового слова значения фазы опорного пучка. Предложенный алгоритм позволяет уменьшить объем голографической информации за счет использования квантованной фазовой компоненты голограммы и повысить уровень защищенности изображения за счет кодирования голографируемого изображения и опорного пучка.

Влияние числа итераций и количества уровней квантования фазовой компоненты голограммы на качество восстановленного изображения на примере аэроснимка городских кварталов показано на рис. 1 и 2.

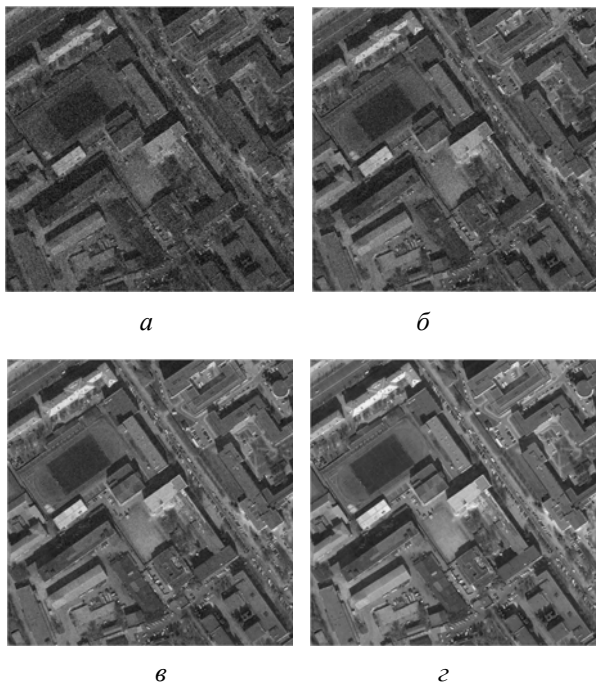


Рис. 1. Восстановленные изображения аэроснимка (256 уровней квантования фазы) при разном числе итераций: а – 1 итерация; б – 4 итерации; в – 16 итераций; г – 64 итерации

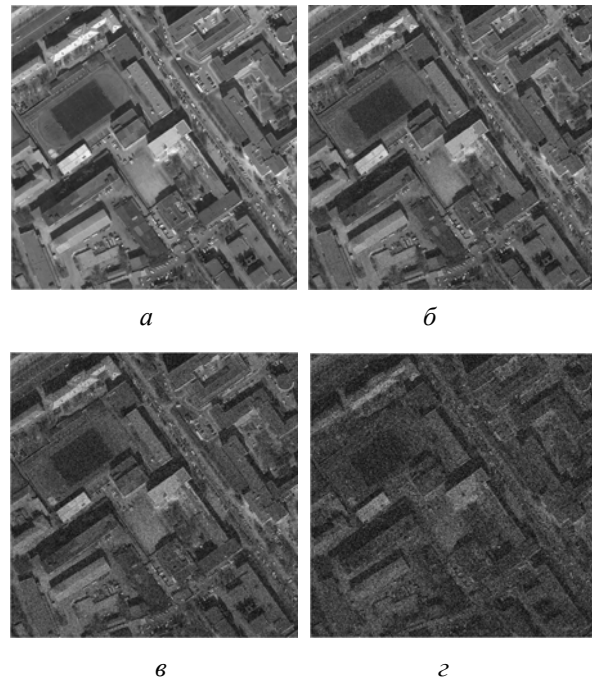


Рис. 2. Зависимость качества восстановленных изображений от количества уровней квантования фазовой компоненты голограммы: а – 256 уровней; б – 16 уровней; в – 8 уровней; г – 4 уровня

На рис. 3 приведены зависимости качества восстановленных изображений, оцениваемого при помощи метрики  $PSNR$ , при фиксированных 256 уровнях квантования фазовой компоненты (рис. 3, а) и при 128 итерациях восстановления (рис. 3, б). Из рис. 1–3 видно, что для приемлемого качества восстановления изображения с  $PSNR > 31$  дБ при 64 уровнях квантования фазовой компоненты голограммы достаточно 128 итераций.

Цифровая технология позволяет синтезировать амплитудную Фурье-голограмму для компьютерного полутонного изображения по схеме без использования опорного пучка. При этом получение квантованной безопорной амплитудной Фурье-голограммы с защитой основано не на моделировании интерференции объектного и опорного пучков, а на следующей последовательности шагов:

- формирование защищаемого фазового изображения  $\varphi_2 = (\varphi_2(m, n) | m = \overline{1, M}, n = \overline{1, N})$  с псевдослучайным кодированием;
- формирование комплексного объектного пучка:

$$I_{12e} = (I_{12e}(m, n) = I_1(m, n) \exp(j\varphi_{2e}(m, n)) | m = \overline{1, M}; n = \overline{1, N});$$

- построение картины интерференции комплексного  $I_{12e}$  и симметрично-сопряженного комплексного  $I_{12e}^*$  изображений в Фурье-области;

– квантование коэффициентов дискретного преобразования Фурье для сопряженного симметрично-расширенного комплексного изображения  $I_S$ :

$$H_{FA} = \left( H_{FA}(p, q) \middle| p = \overline{1, M}; q = \overline{1, N} \right), \quad (2)$$

где  $H_{FA}(p, q)$  – значение элемента разрешения с координатами  $(p, q)$  цифровой квантованной голограммы

$$H_{FA}(p, q) = \text{round} \left\{ \frac{255(F_H(p, q) - \min(F_H(p, q)))}{\max(F_H(p, q)) - \min(F_H(p, q))} \right\},$$

$F_H(p, q) = FT(I_S(m, n))$  – действительное значение двумерного Фурье-спектра с координатами  $(p, q)$ ;  $I_S(m, n)$  – значение элемента сопряженного симметрично-расширенного комплексного изображения  $I_{12}$ :

$$I_S(m, n) = \begin{cases} I_{12e}(m, n) & \text{при } m = \overline{2, M}, n = \overline{2, N}, \\ I_{12e}^*(2M - m + 2, 2N - n + 2) & \\ \text{при } m = \overline{M + 2, 2M}, n = \overline{2, N}, \\ 0 & \text{при } m = 1 \cup n = 1 \cup m = M; \end{cases}$$

$I_S = (I_S(m, n) = IFT(H_{FA}(p, q) \middle| m = \overline{1, M}; n = \overline{1, 2N}))$ ,  $I_{12e}(m, n) = I_1(m, n)\exp(j\varphi_{2e}(m, n))$  – комплексная амплитуда составного изображения с координатами  $(m, n)$ , включающая амплитудную  $I_1(m, n)$  и зашифрованную фазовую  $\varphi_{2e}(m, n)$  информацию;  $I_1 = (I_1(m, n))$  и  $I_2 = (I_2(m, n))$  – защищаемые полутонные изображения с  $I_{12}(m, n) \in \{0, 255\}$ ; \* – символ комплексного сопряжения;  $\varphi_2$  и  $\varphi_{2e}$  – исходное и зашифрованное фазовые изображения входного изображения  $I_2$  при  $\varphi_2(m, n) \in (-\pi, \pi)$  с помощью знакопеременной псевдослучайной маски  $b(m, n)$ :

$$\varphi_2(m, n) = \frac{2\pi I_2(m, n)}{\max(I_2(m, n)) - \min(I_2(m, n))} - \pi;$$

$$\varphi_{2e} = \left( \varphi_2(m, n)b(m, n) \middle| m = \overline{1, M}; n = \overline{1, N} \right).$$

Пример изображений, получаемых на этапах синтеза безопорной голограммы Фурье, приведен на рис. 4. Метод обладает меньшей вычислительной сложностью по сравнению с итерационной процедурой интерференционной модели и позволяет осуществить сокрытие двух изображений посредством их представления в виде амплитудной  $I(m, n)$  и фазовой  $\varphi(m, n)$  форм.

При этом сохраняется устойчивость к повреждениям голограммы, так как каждый ее пиксель содержит всю информацию об исходном изображении, и восстановление изобра-

жения может быть осуществлено из любой части голограммы.

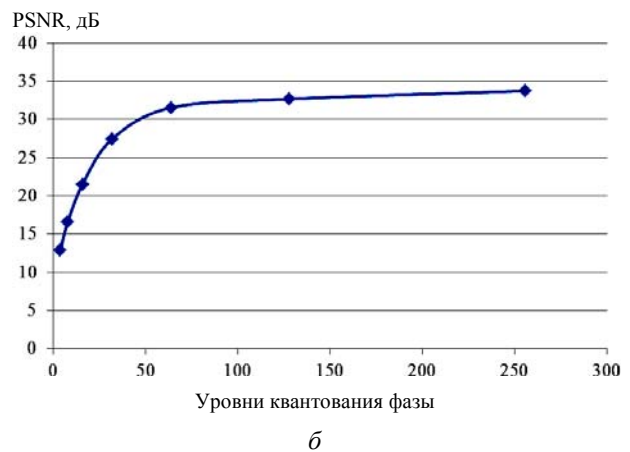
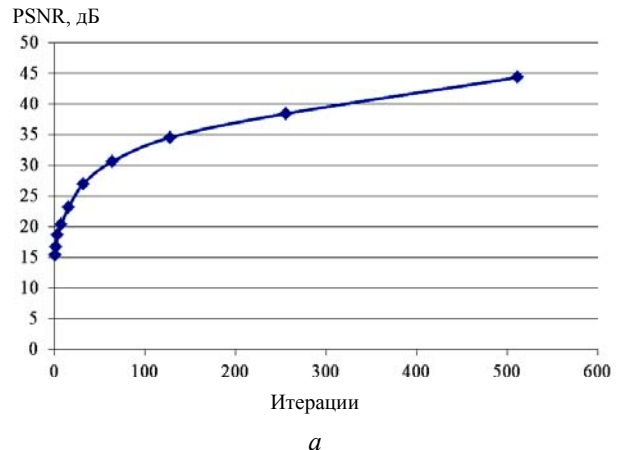


Рис. 3. Зависимости отношения сигнал/шум (PSNR) на восстановленных голографических изображениях: а – от количества итераций (при 256 уровнях); б – от количества уровней квантования (при  $k = 128$ )

Процесс восстановления полутонных изображений  $I_1$  и  $I_2$  определяется вычислением обратного преобразования Фурье для безопорной голограммы  $H_{FA}$  с помощью соотношения выделением фазовой компоненты комплексного объектного пучка  $\varphi_{2e}(m, n)$  и демодуляции ее при помощи дисперсионной фазовой маски, использованной при модуляции защищаемого фазового изображения

$$I_2(m, n) = \left( \frac{255D_{K_s}(\varphi_{2e}(m, n)) + \pi}{\max(D_{K_s}(\varphi_{2e}(m, n))) - \min(D_{K_s}(\varphi_{2e}(m, n)))} \right).$$

Размерность пространства секретных ключей безопорной амплитудной Фурье-голограммы равна  $2^{MN}$ .

**Модели голограмм Френеля.** Синтез цифровой модели квантованной голограммы Френеля  $H_{FR}$  основан на формировании интерфе-



ренционной структуры Френеля, образуемой наложением кодированного опорного пучка  $R_\theta$  на образ Френеля исходного объектного пучка  $I_0$ . Пространственное распределение интенсивности  $H_{FR}(p, q)$  в плоскости регистрации голограммы имеет вид:

$$H_{FR} = \left( H_{FR}(p, q, d) \Big|_{p=\overline{1, M}; q=\overline{1, N}} \right), \quad (3)$$

где  $H_{FR}(p, q, d)$  – комплексная амплитуда с координатами  $(p, q)$  в плоскости голограммы Френеля:

$$H_{FR}(p, q, d) = R_\theta^*(p, q)U_0(p, q, d) = |H_{FR}(p, q, d)| \exp(j\varphi_{FR}(p, q, d)).$$

Здесь  $U_0(p, q, d)$  – прямое дискретное преобразование Френеля исходного изображения  $U_0$ :

$$U_0(p, q, d) = \frac{k}{j2\pi d} \exp(jkd) \sum_m \sum_n W(m, n);$$

$$W(m, n) =$$

$$= U_0(m, n) \exp\left( \frac{jk}{2d} \left[ (p\Delta p - m\Delta x)^2 + (q\Delta q - n\Delta y)^2 \right] \right);$$

$m, n$  – пространственные индексы в области Френеля  $m = -M/2; M/2 - 1$  и  $n = -N/2; N/2 - 1$ ;  $\Delta p, \Delta q$  – расстояния между соседними пикселями (или размеры пикселей) голограммы в вертикальном и горизонтальном направлениях;  $\Delta x, \Delta y$  – расстояния между пикселями изображения в пространственной области, связанные с расстояниями между коэффициентами Френеля через ключевые параметры  $\lambda, d$ , и  $M \times N$ :

$$\Delta x = \lambda d / M\Delta p; \Delta y = \lambda d / N\Delta q;$$

$k = 2\pi / \lambda$  – числовой параметр, соответствующий волновому числу виртуального падающего монохроматического света;  $d$  – расстояние между исходным изображением  $U_0$  размером  $M \times N$  и плоскостью регистрации голограммы.

Преобразование Френеля традиционно используется для описания распространения света в свободном пространстве на расстояниях  $d \gg B$  (размер исходного изображения). Для вычисления преобразования Френеля на сравнительно малых расстояниях ( $d \approx B$ ) одним из решений является увеличение числа изображений с помощью операции дополнения нулями.

При использовании двумерного кодирующего ключа модель интерференционно-дифракционной голограммы Френеля (3) с защитой имеет вид:

$$H_{FR}(p, q, d) = |R_\theta(p, q) + U_0(p, q, d)|^2 = |R_\theta(p, q)|^2 + |U_0(p, q, d)|^2 + R_\theta^*(p, q)U_0(p, q, d) + R_\theta(p, q)U_0^*(p, q, d),$$

где  $\varphi_{FR}(p, q, d) = \varphi_0(p, q, d) - \theta_R(p, q)$  и  $|H_{FR}(p, q, d)|$  – фазовая и амплитудная компоненты голограммы Френеля соответственно.

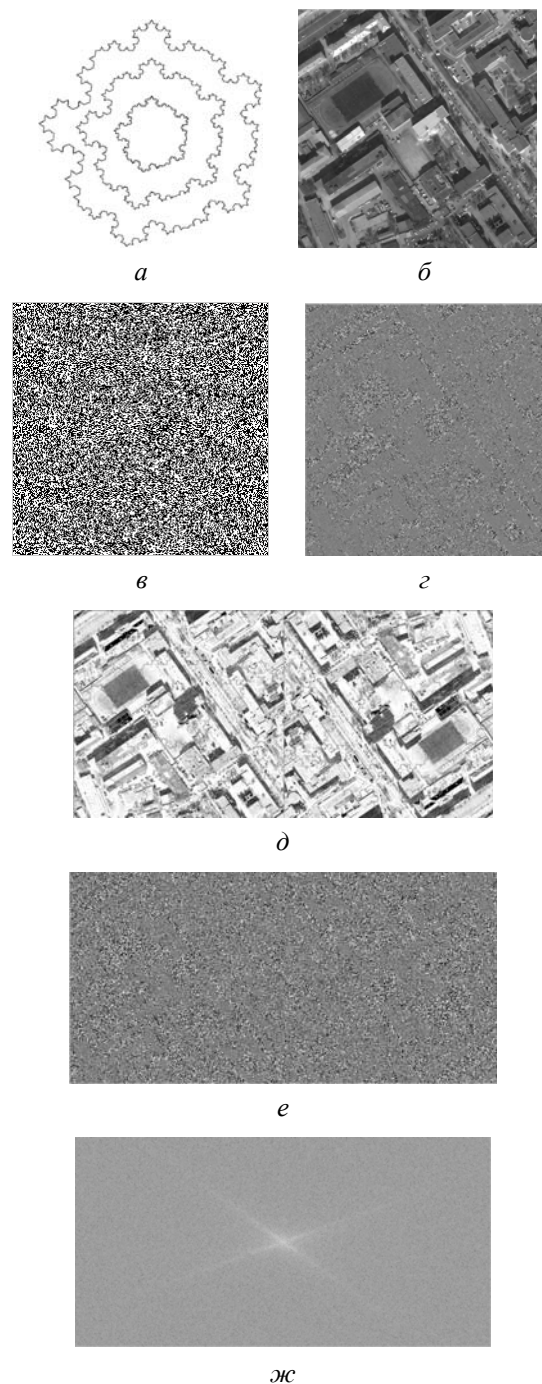


Рис. 4. Процесс формирования безопорной амплитудной голограммы Фурье: а – исходное псевдослучайное фрактальное изображение; б – исходное защищаемое изображение; в – псевдослучайная фазовая маска с равномерным распределением значений +1 и -1; г – зашифрованное фазовое изображение; д, е – действительная и мнимая компоненты сопряженного симметрично-расширенного комплексного объектного пучка; ж – безопорная амплитудная голограмма Фурье

Восстановление голограммы Френеля осуществляется с помощью кодированного опорного пучка  $R_0$  и обратного дискретного преобразования Френеля

$$U_0(p, q, d) = \frac{k}{j2\pi d} \exp(-jkd) \sum_m \sum_n V(m, n);$$

$$V(m, n) = H_{FR}(m, n, d) \times$$

$$\times \exp\left(\frac{jk}{2d} [(p\Delta p - m\Delta x)^2 + (q\Delta q - n\Delta y)^2]\right).$$

Свойство избыточности голограммы Френеля позволяет из ее части восстановить полное изображение, что иллюстрируется рис. 5. Синтез голограммы проведен при  $\lambda = 532$  нм,  $d = 36$  см и  $\Delta p = \Delta q = 9$  мкм, а при восстановлении использован ее фрагмент с размерами, составляющими половину площади голографического изображения.

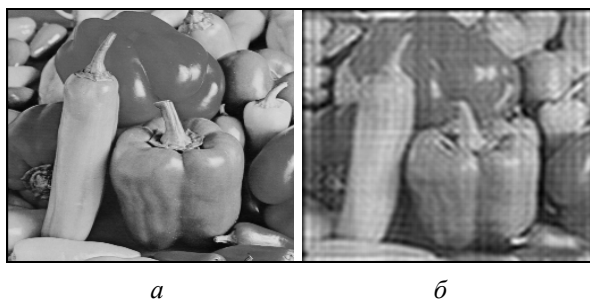


Рис. 5. Восстановление изображения из части голограммы Френеля:  
а – исходное изображение;  
б – восстановленное изображение

Результаты моделирования, которые демонстрируются на рис. 6, показывают возможности восстановления изображений из отдельных компонент голограммы Френеля. Качество восстановленного изображения ухудшается, когда используется только действительная или только мнимая часть голограммы. Изображение, восстановленное при использовании фазовой компоненты, имеет лучшее качество. Следует отметить, что изображение не может быть восстановлено при использовании только амплитудной компоненты (рис. 6, г).

Введение индивидуальных кодирующих ключей в голографические изображения позволяет объединять несколько голограмм в одну, так называемую наложенную или мультиплексную голограмму. Модель защищенных квантованных наложенных голограмм Френеля, основанная на выборе правила объединения в мультиплексную голограмму нескольких опорных голограмм, включая безопорную голограмму Френеля кодирующей псевдослучайной фазовой маски, имеет вид

$$H_{FR} = \sum_{k=1}^K \alpha_k H_k + H_{Mask}, \quad (4)$$

где  $K$  – число изображений наложенной голограммы Френеля;  $\alpha_k$  – весовой коэффициент  $k$ -го изображения;  $H_k$  – безопорные голограммы Френеля  $K$  изображений, расположенных на различных расстояниях  $d_k$  от плоскости регистрации;  $H_{Mask}$  – безопорная голограмма Френеля псевдослучайной фазовой маски, значения фаз в которой равномерно распределены в диапазоне  $(-\pi, \pi)$ .

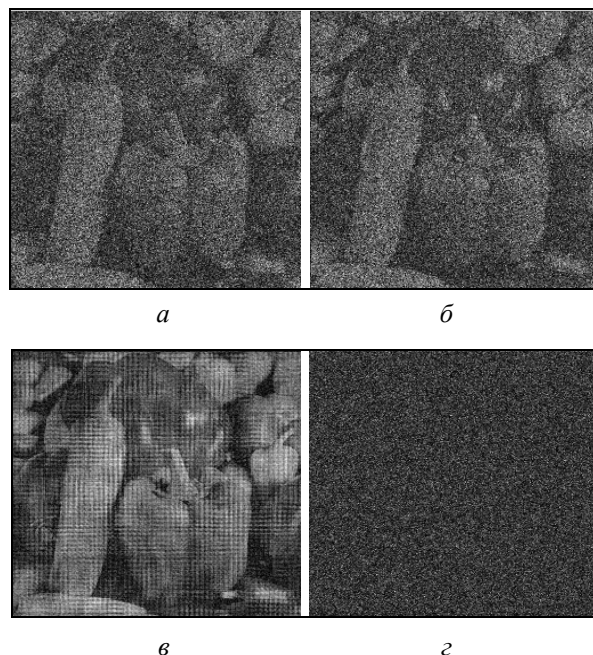


Рис. 6. Восстановление изображений из частей и компонент голограммы Френеля:  
а – из действительной части; б – из мнимой части;  
в – из фазовой компоненты;  
г – из амплитудной компоненты

Одной из особенностей наложенных голограмм Френеля является возможность создания художественного эффекта на основе различных муаровых шаблонов. Голографические муаровые шаблоны с артистическим эффектом можно применять в качестве секретных кодов в голограммах для улучшения их защитных свойств. Результаты восстановления двухслойной голограммы с муаровым эффектом представлены на рис. 7.

В качестве возможных секретных ключей для каждого изображения наложенной голограммы Френеля могут быть использованы виртуальная длина волны  $\lambda$ , виртуальное расстояние от плоскости изображения до плоскости голограммы  $d_k$ , линейные размеры пикселя по горизонтали и вертикали ( $\Delta x$  и  $\Delta y$ ), положение в пространстве, функция распределения и размерность псевдослучайной кодирующей маски.



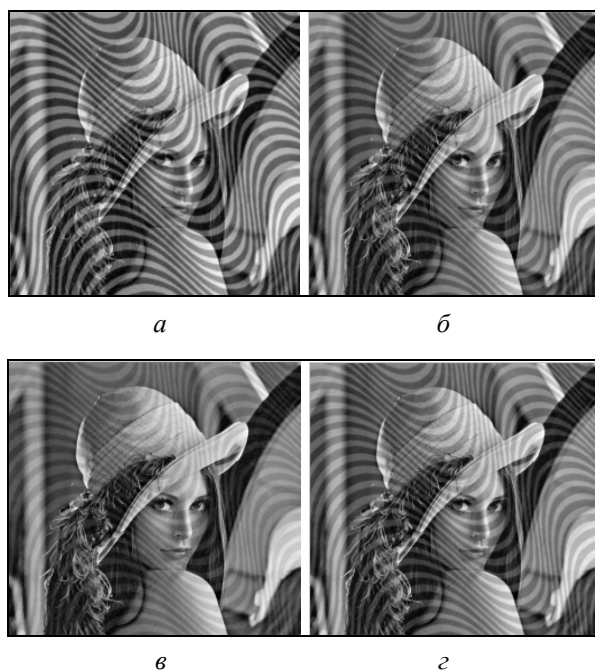


Рис. 7. Двухслойные изображения с муаровым эффектом для синтеза и восстановления безопорной мультиплексной голограммы Френеля с различными параметрами  $d_2$  и  $\alpha_k$  при  $d_1 = 36$  см и  $\lambda = 632$  нм:

$a - d_2 = 9$  см,  $\alpha_k = 1$ ;  $б - d_2 = 9$  см,  $\alpha_k = 2$ ;  
 $в - d_2 = 9$  см,  $\alpha_k = 4$ ;  $г - d_2 = 190$  см,  $\alpha_k = 1$

**Заключение.** Предложены модели (1) и (2) защищенных квантованных голограмм Фурье, основанные на амплитудном и фазовом псевдослучайном кодировании опорного и объектного пучков, формировании интерференционной структуры с опорным пучком или без него. При уста-

новлении оптимального соотношения между качеством восстановленных изображений и коэффициентом сжатия информации о голограмме обеспечивается  $PSNR \geq 30$  дБ. Метод позволяет синтезировать вещественные квантованные голограммы с возможностью одновременного сокрытия амплитудной и защиты фазовой компонент комплексного изображения за счет увеличения множества двухмерных секретных ключей (более  $2^{128}$ ) в виде псевдослучайных амплитудных и фазовых кодирующих матриц, а также сохранения высокого уровня устойчивости к площадным повреждениям.

Разработана модель (3) защищенных квантованных голограмм Френеля, основанная на синтезе образа интерференции Френеля исходного изображения и опорного пучка с псевдослучайным амплитудно-фазовым кодированием. Ключевыми параметрами голограмм Френеля являются расстояние между исходным изображением и плоскостью голограммы, виртуальная длина волны и секретный ключ генератора фазовой маски опорного пучка.

Предложена модель (4) для синтеза защищенных наложенных голограмм, основанная на синтезе безопорных голограмм Френеля для изображений, ключевыми параметрами которых являются их расстояния до плоскости регистрации голограмм, и выборе правила их объединения с безопорной голограммой Френеля кодирующей псевдослучайной фазовой маски. Метод позволяет создавать новые визуальные эффекты, моделирующие фоновую обстановку наблюдения голографических изображений.

### Литература

1. Гориленко А. Я., Корочкин Л. С. Современные методы защиты банкнот и ценных бумаг от подделки // Труды БГТУ. Сер. IX, Издат. дело и полиграфия. 2002. Вып. X. С. 61–69.
2. Javidi B., Nomura T. Securing information by use of digital holography // Optics Letters. 2000. Vol. 25. P. 28–30.
3. Erokhovets V. K., Tkachenko V. V. Information capacity of localized latent Fourier-holograms // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). 2010. Vol. 19, no. 1. P. 1–7.
4. Борискевич А. А., Ероховец В. К., Ткаченко В. В. Синтез цифровых фазовых голограмм Френеля // ГолоЭкспо-2015. Голография. Наука и практика: сб. науч. тр. 12-й Междунар. науч.-практ. конф., Казань, 12–15 окт. 2015 г. / М-во образования и науки Рос. Федерации, Казанский нац. исслед. ун-т. Казань, 2015. С. 139–143.
5. Yaroslavsky L. P. Digital Holography and Digital Image Processing – Principles, Methods, Algorithms. Luxembourg, Springer Science & Business Media, 2013. 584 p.
6. Методы компьютерной оптики / под ред. В. А. Сойфера. 2-е изд., испр. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 688 с.
7. Борискевич А. А., Ероховец В. К., Ткаченко В. В. Голографическая защита информации Минск: ОИПИ НАН Беларуси, 2012. 280 с.
8. Aswathy S., Praveen P., and Anith N. Securing Digital Holographic Complex Information using Double Random Phase Fresnel Plane Encoding and Diie-Hellman Key Exchange // Indian Journal of Science and Technology, 2015. Vol. 8 (19), no. 8. P. 1–7. DOI: 10.17485/ijst/2015/v8i19/76230.
9. Борискевич А. А., Ероховец В. К., Ткаченко В. В. Защитные элементы на основе цифровых (компьютерно-синтезируемых) голограмм // Труды БГТУ. 2012. № 9: Издат. дело и полиграфия. С. 116–121.

### References

1. Gorilenko A. Ya., Korochkin L. S. Modern methods of protection against counterfeiting of bank notes and securities. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU]. Series IX, Printing and Publishing, 2002, issue X, pp. 61–69 (In Russian).
2. Javidi B., Nomura T. Securing information by use of digital holography. *Optics Letters*, 2000, vol. 25, pp. 28–30.
3. Erokhovets V. K., Tkachenko V. V. Information capacity of localized latent Fourier-holograms. *Optical Memory and Neural Networks (Information Optics)*, 2010, vol. 19, no. 1, pp. 1–7.
4. Boriskevich A. A., Erokhovets V. K., Tkachenko V. V. Digital phase Fresnel holograms synthesis. *Sbornik nauchnykh trudov "GoloExpo-2015. Golografiya. Nauka i praktika"* [Proceedings of 12th International Conference "HoloExpo 2015. Holography. Science and practice"]. Kazan, 2015, pp. 139–143 (In Russian).
5. Yaroslavsky L. P. *Digital Holography and Digital Image Processing – Principles, Methods, Algorithms*. Luxembourg, Springer Science & Business Media, 2013. 584 p.
6. *Metody komp'yuternoy optiki* [Methods of computer optics], ed. by V. A. Soifer. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2003. 688 p.
7. Boriskevich A. A., Erokhovets V. K., Tkachenko V. V. *Golograficheskaya zashchita informatsii* [Holographic information security]. Minsk, OIPI NAN Belarusi Publ., 2012. 280 p.
8. Aswathy Sankaran, Praveen Phinehas, Anith Nelleri. Securing Digital Holographic Complex Information using Double Random Phase Fresnel Plane Encoding and Diie-Hellman Key Exchange. *Indian Journal of Science and Technology*, 2015. vol. 8 (19), no. 8. pp. 1–7. DOI: 10.17485/ijst/2015/v8i19/76230.
9. Boryskevych A. A., Erokhovets V. K., Tkachenko V. V. The Protective Elements on the Basis of Digital (computer-synthesized) Holograms. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU]. 2012, no. 9: Printing and Publishing, pp. 116–121 (In Russian).

### Информация об авторах

**Борискевич Анатолий Антонович** – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры телекоммуникаций. Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, Республика Беларусь). E-mail: anbor@belstu.by

**Ероховец Валерий Константинович** – кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник. Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси (220012, г. Минск, ул. Сурганова, 6, Республика Беларусь). E-mail: erokhovets@newman.bas-net.by

**Ткаченко Вадим Викторович** – кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией компьютерной графики. Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси (220012, г. Минск, ул. Сурганова, 6, Республика Беларусь). E-mail: tkach@newman.bas-net.by

### Information about the authors

**Boriskevich Anatoliy Antonovich** – DSc (Engineering), Associate Professor, Professor, the Department of Infocommunication Technologies. Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (6, P. Brovki str., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: anbor@bguir.by

**Erokhovets Valeriy Konstantinovich** – PhD (Engineering), Associate Professor, Leading Researcher. United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus (6, Surganova str., 220012, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: erokhovets@newman.bas-net.by

**Tkachenko Vadim Viktorovich** – PhD (Engineering), Associate Professor, Head of Computer Graphics Laboratory. United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus (6, Surganova str., 220012, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: tkach@newman.bas-net.by

Поступила 17.08.2017