

УДК 778.38:777.6

ГОЛОГРАФИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ВСТРАИВАНИЮ СКРЫТЫХ ВОДЯНЫХ ЗНАКОВ В ФОТОИЗОБРАЖЕНИЕ

© 2005 г. М. В. Смирнов, канд. техн. наук

ЗАО IWA "TheWebProduction", Санкт-Петербург

E-mail: m.smirnov@thewebproduction.com

Изложен голографический подход к встраиванию скрытых цифровых водяных знаков в фотоизображения. Дана физическая интерпретация процессов встраивания и визуализации скрытых водяных знаков. Установлено, что преобразование Фурье водяных знаков, встраиваемых в частотной области со сдвигом относительно центра координат, представляет собой цифровую голограмму Фурье. Разработан оптимизированный метод внедрения водяных знаков на основе голограммы Фурье с одной боковой полосой. Экспериментальные исследования на типовом фотографическом оборудовании показали устойчивое восстановление водяных знаков для голограмм Фурье.

Коды OCIS: 090.0090, 090.1760.

Поступила в редакцию 15.11.2004.

Введение

Развитие средств и методов защиты информационного наполнения документов остается традиционной и актуальной задачей. Одним из ключевых элементов многих документов является фотография. Защита авторских прав или прав владельцев на фотоизображение, защита торговой марки полиграфической продукции, противодействие копированию и подделкам фотографий – вот далеко не полный список применений методов защиты изображений. В последние годы большую популярность получили методы защиты изображений с помощью скрытых цифровых водяных знаков [1, 2]. По мнению авторов [3], наметилось новое научное направление – цифровая стеганография. К составной части этого направления относится встраивание цифровых водяных знаков (ВЗ) в изображение.

Хотя процесс внедрения цифровых ВЗ и процесс идентификации решаются исключительно цифровыми средствами, процессы фотопечати и сканирования фотодокументов остаются аналоговыми. Очевидно, что методы внедрения скрытых ВЗ должны обеспечивать устойчивость к физическим воздействиям со стороны фотопечати и сканирования. Для преодоления воздействий фотопечати и сканирования наиболее успешными оказались методы, получившие название методов "модуляции" изображения-контейнера, причем модуляция может осуществляться как в частотной [4–8], так и в пространственной областях изображения [9, 10]. Для компенсации геометриче-

ских искажений типа смещения, поворота и изменения масштаба изображения используется полярная логарифмическая система координат с углом θ и логарифмическим радиусом по осям координат [4, 6] или применяется инвариантное к повороту и масштабу преобразование Меллина [5]. В [7, 8] проведено исследование влияния комбинированного воздействия геометрических и яркостных искажений на устойчивость ВЗ.

В случае внедрения ВЗ в частотной области модуляции подвергаются амплитудные составляющие комплексного спектра изображения-контейнера [4, 6]. Для этого предварительно осуществляется вычисление амплитудной и фазовой составляющих компонентов преобразования Фурье. Для оценки последствий геометрических искажений, связанных со случайным поворотом, смещением или изменением масштаба, в изображение-контейнер, кроме ВЗ, встраивается изображение-шаблон [4]. В случае внедрения ВЗ в пространственной области сигнал ВЗ встраивается путем модуляции исходного изображения-контейнера, а извлечение ВЗ (демодуляция) выполняется с помощью линейной фильтрации изображения [10]. Если изображение цветное, сигнал ВЗ внедряется путем модификации значений пикселей в BLUE канале RGB изображения [9]. Модификация осуществляется либо добавлением, либо вычитанием в зависимости от значения внедряемого бита ВЗ и яркости изображения-контейнера.

Основной недостаток этих методов связан с низким уровнем технологичности процессов внедрения

и извлечения ВЗ, что отрицательно сказывается на их практическом применении, хотя потенциал этих методов, благодаря устойчивости к процедурам фотопечати и сканирования, весьма значителен. И главное, в приведенных работах осталась не раскрытой физическая природа процессов встраивания и извлечения ВЗ.

Вне зависимости от того, в какой области, пространственной или частотной, выполняется модуляция изображения, в основе этих методов лежит интерференция между волновым полем, рассеянным ВЗ, и пространственной несущей. Здесь проявляется известное свойство преобразования Фурье, которое характеризуется сдвигом спектра сигнала при умножении сигнала на гармоническое колебание. Действительно, используя преобразование Фурье объектов, имеющих сдвиг в частотной плоскости относительно начала координат, получаем интерференцию волнового поля, рассеянного объектом, с опорным волновым пучком, то есть комплексную голограмму. Процесс восстановления объекта сопровождается появлением действительного и мнимого изображений. Так, в работе [11] для моделирования голографических процессов применялся способ преобразования Фурье простых объектов, имевших некоторое смещение относительно начала координат. Такие голограммы получили название цифровых голограмм Фурье [12, 13].

На этапах фотопечати и сканирования изображений, содержащих ВЗ, неизбежно возникают проблемы, связанные с геометрическими искажениями, обусловленными ошибками позиционирования фотодокументов. И хотя в литературе этому вопросу уделяется достаточно большое внимание, голографическая интерпретация не менее актуальна. Отличие в трактовках особенно заметно в вопросе случайного смещения изображения, например, при сканировании изображения, содержащего ВЗ. В работе [4] реакция на подобное смещение описывается сверткой ВЗ с sinc-функцией в частотной плоскости, что при малых смещениях не оказывает сильного влияния на восстановление ВЗ. Более существенное влияние обусловлено фазовыми искажениями. При смещении изображения-носителя, например, на k дискретных элементов возникает линейный фазовый сдвиг ВЗ в частотной области, что равносильно умножению ВЗ на фазовый множитель $\exp(k2\pi u)$, где u – пространственная частота. Таким образом, при возникновении смещения изображения-носителя на k пикселей изображение ВЗ после восстановления будет представлять собой произведение ВЗ на функцию $\cos(k2\pi u)$ и иметь полосатую структуру.

В случае поворота и изменения масштаба особых разногласий не возникает. Уменьшение масштаба фотоизображения-носителя приводит к смеще-

нию ВЗ в сторону высоких частот, а увеличение масштаба приближает ВЗ к центру координат в частотной плоскости. Реакция на поворот фотоизображения-носителя сопровождается угловым смещением ВЗ в области пространственных частот.

Общий принцип получения цифровой голограммы Фурье для ВЗ рассмотрен в следующем разделе. Эквивалентное решение в частотной области представлено в разделе 2. В разделе 3 рассмотрен вариант с применением рассеивателя. И, наконец, в разделе 4 представлен оптимизированный вариант внедрения ВЗ в частотной области с одной боковой полосой.

1. Цифровая голограмма Фурье водяного знака

Математически оригинальное изображение-контейнер $g(x, y)$, изображение водяного знака $W(u, v)$ и результирующее (содержащее ВЗ) изображение-носитель $s(x, y)$ связаны соотношением:

$$s(x, y) = g(x, y) + f\{W(u, v)\}, \quad (1)$$

где f – функция преобразования изображения ВЗ в голограмму $h(x, y)$. По определению функции $s(x, y)$ и $g(x, y)$ являются вещественными и положительными. Очевидно, что такой же должна быть и функция голограммы $h(x, y)$.

Одним из основных подходов для получения оптических голограмм является добавление к световой волне, рассеянной объектом, опорной волны. Цифровые голограммы Фурье представляют собой запись пространственного преобразования Фурье от рассеянного предметом светового поля со сдвинутой пространственной несущей [14, 15]. В общем случае голограмму можно представить как комплексную функцию. Комплексное преобразование Фурье изображения водяного знака $W(u, v)$ в плоскости записи голограммы представим в форме:

$$w(x, y) = |w(x, y)| \exp\{j\Phi(x, y)\},$$

где $\Phi(x, y)$ – аргумент комплексной функции $w(x, y)$. Добавим к волновому полю $w(x, y)$ опорную когерентную волну $\exp\{j(xM + yN)\}$, где M и N – углы падения волны по нормали к плоскости регистрации голограммы [15]. Распределение интенсивности в плоскости регистрации представляет собой квадрат модуля суммы волнового поля $w(x, y)$ и опорной волны:

$$\begin{aligned} h(x, y) &= [|w(x, y)| \exp\{j\Phi(x, y)\} + \exp\{j(xM + yN)\}]^2 = \\ &= |w(x, y)|^2 + |w(x, y)| \cos[xM + yN + \Phi(x, y)] + 1. \end{aligned} \quad (2)$$

Первый член в выражении (2) характеризует дополнительную засветку голограммы пучком света от

объекта и обычно опускается. Этот член не содержит фазовой характеристики и не несет никакой информации о восстановленном изображении. Окончательно получим:

$$h(x, y) = A_0 + |w(x, y)| \cos[xM + yN + \Phi(x, y)],$$

где постоянная составляющая A_0 – максимальное значение $w(x, y) = w(0, 0)$. Таким образом, функция $h(x, y)$ является вещественной, положительной и содержит полную информацию (как амплитудную, так и фазовую) об изображении водяного знака $W(u, v)$. Преобразование Фурье от полученной функции голограммы $h(x, y)$ будет состоять из суммы двух изображений водяного знака $W(u, v)$, смещенных относительно начала осей координат на величины несущих частот M и N :

$$\begin{aligned} \mathfrak{F}\{h(x, y)\} &= \tilde{W}(u, v) = \\ &= W(u - M, v - N) + W(-u - M, -v - N) + A(u, v), \end{aligned} \quad (3)$$

где \mathfrak{F} – оператор фурье-преобразования, $A(u, v)$ – автокорреляционная функция ВЗ. Автокорреляция $A(u, v)$ располагается в начале координат и подавляется как в цифровой голографии, так и в оптической. Второе изображение $W(-u - M, -v - N)$ является зеркальным отображением $W(u - M, v - N)$ относительно центра осей координат.

Таким образом, выражение (3) подсказывает алгоритм синтеза изображения ВЗ для получения голограммы $h(x, y)$, удовлетворяющей условию быть вещественной положительной функцией. Последовательность действий состоит в следующем: сначала в предметной плоскости x, y изготавливается собственно изображение водяного знака $W(x, y)$, затем ВЗ переносится в плоскость пространственных частот u, v со смещением относительно осей координат на значения M и N : $W(u - M, v - N)$. После этого создается зеркальное изображение ВЗ и получается сумма двух изображений:

$$\tilde{W}(u, v) = \gamma W(u - M, v - N) + \gamma W(-u - M, -v - N), \quad (4)$$

где γ – коэффициент усиления. Для получения искомого распределения $h(x, y)$ выполняется обратное преобразование Фурье:

$$h(x, y) = \mathfrak{F}^{-1}\{\tilde{W}(u, v)\},$$

где \mathfrak{F}^{-1} – оператор обратного преобразования Фурье. На рис. 1а показана цифровая голограмма ВЗ "copyright".

Отметим, что предельные размеры изображения ВЗ не должны превышать размеры квадранта частотной плоскости. Это вытекает из выражения (4). В противном случае произойдет перекрытие сигналов $W(u - M, v - N)$ и $W(-u - M, -v - N)$. Выбор оптимального размера ВЗ, с одной стороны,

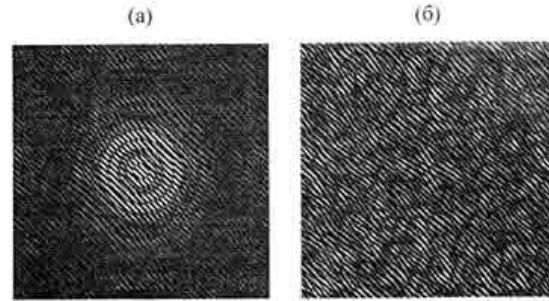


Рис. 1. Цифровая голограмма Фурье водяного знака "copyright": а – без рассеивателя, б – с рассеивателем.

представляет собой компромисс между устойчивостью ВЗ к искажениям и видимостью возмущений, вызванных внедрением ВЗ в изображение-контейнер [4]. С другой стороны, оптимальный размер ВЗ определяется функцией передачи модуляции (ФПМ) сквозного оптико-электронного тракта [16], включающего фотоприемник, фотоноситель и сканер на ПЗС. Размеры $W(u, v)$ должны укладываться в области определения ФПМ сквозного тракта. Это означает, что функция $W(u, v)$ должна быть узкополосной.

2. Внедрение водяного знака в частотной области

Выражение (1) предусматривает предварительное изготовление голограммы ВЗ и последующее выполнение операции сложения голограммы $h(x, y)$ с оригинальным изображением $g(x, y)$. Эквивалентное решение может быть получено и в частотной области. Для этого нужно выполнить фурье-преобразование изображения $g(x, y)$, а результат пространственно сложить с изображением водяного знака $\tilde{W}(u, v)$ (4). Для получения конечного изображения, содержащего голограмму водяного знака, необходимо выполнить обратное преобразование Фурье:

$$s(x, y) = \mathfrak{F}^{-1}\{\mathfrak{F}[g(x, y)] + \tilde{W}(u, v)\}.$$

3. Фурье-голограмма водяного знака с рассеивателем

Известно, что фурье-преобразование многих объектов имеет значительный динамический диапазон. Постоянное значение и амплитуды низкочастотных составляющих значительно превышают амплитуды других составляющих. В оптической голографии это создает проблему записи голограммы на фотоноситель. В рассматриваемом случае существует похожая проблема. В изображении-но-

сителе могут появляться сильные возмущения, обусловленные внедрением голограммы ВЗ.

В оптике для устранения этой проблемы перед предметом устанавливают рассеиватель, в цифровой голографии [17] – оригинальное изображение умножается на произвольный фазовый множитель $\exp\{j\xi(u, v)\}$. Случайная фаза $\xi(u, v)$ перераспределяет энергию в частотной области, в результате чего коэффициенты Фурье становятся более однородными, а гистограмма значений интенсивности голограммы сужается.

На рис. 1б показана цифровая голограмма ВЗ, полученная с использованием случайного фазового рассеивателя.

4. Метод голограммы Фурье с одной боковой полосой

Из выражения (4) очевидна избыточность представления изображения водяного знака $\tilde{W}(u, v)$ в виде суммы двух изображений. В радиотехнике с целью повышения эффективности передатчиков широко применяется метод передачи сообщений с одной боковой полосой (ОБП), при этом вторая боковая полоса и несущая подавляются. Поступим аналогично при создании цифровой голограммы ВЗ. Выполним комплексное преобразование Фурье функции $W(u - M, v - N)$:

$$\hat{h}(x, y) = \mathcal{F}^{-1}\{W(u - M, v - N)\},$$

где $\hat{h}(x, y)$ – комплексная голограмма, которая состоит из вещественной и мнимой частей:

$$\begin{aligned} \hat{h}(x, y) &= h_c(x, y) + jh_s(x, y) = \\ &= 1/2|w(x, y)|\cos[xM + yN] + \\ &+ j/2|w(x, y)|\sin[xM + yN] + A_0. \end{aligned} \quad (5)$$

Как отмечалось в разделе 1, спектральные сигналы $W(u, v)$ должны быть узкополосными (гильбертовыми). Из этого следует, что первые два члена в выражении (5) связаны между собой преобразованием Гильберта. Для восстановления $\tilde{W}(u, v)$ из голограммы будет достаточно выполнить преобразование Фурье или только вещественной (косинусной), или только мнимой (синусной) части комплексной голограммы $\hat{h}(x, y)$ [18]. Функция $h_c(x, y)$ является вещественной четной функцией, а $h_s(x, y)$ – вещественной нечетной функцией. Поэтому для регистрации голограммы будет достаточно обеспечить условие, что функция $h(x, y)$ положительная. Для этого необходимо вычесть минимальное значение A_{\min} из соответствующих компонентов функции $h(x, y)$:

$$h(x, y) = \hat{h}_c(x, y) - A_{\min}$$

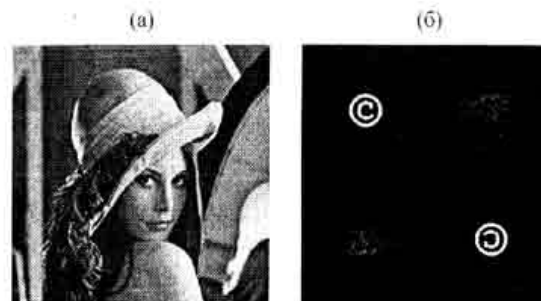


Рис. 2. Восстановление водяного знака из голограммы ОБП: а – изображение-носитель, содержащее голограмму ВЗ с рассеивателем, б – результат восстановления водяного знака.

или

$$h(x, y) = \hat{h}_c(x, y) - A_{\min},$$

где A_{\min} – минимальное значение функции $\hat{h}_c(x, y)$ или $\hat{h}_s(x, y)$. Преобразование Фурье для восстановления изображения ВЗ тождественно выражению (3):

$$\begin{aligned} \mathcal{F}^{-1}\{h(x, y)\} &= 1/2W(u - M, v - N) + \\ &+ 1/2W(-u - M, -v - N) + A(u, v). \end{aligned}$$

Для компьютерного моделирования метода голограммы с ОБП применялось известное тестовое изображение “Lenna”. На рис. 2а представлено изображение, содержащее голограмму ВЗ с рассеивателем, а на рис. 2б показан результат восстановления ВЗ.

Рис. 3а и рис. 3б иллюстрируют свойство восстановления объекта в случае яркостного нарушения (в данном случае затенения) части фотонизображения, содержащего голограмму ВЗ. В процессе моделирования также выполнялось восстановление ВЗ при наличии геометрических искажений (смещение, поворот, изменение масштаба, вырезание кадра) изображения-носителя. Также были проведены эксперименты встраивания и восстановления полутонных ВЗ.

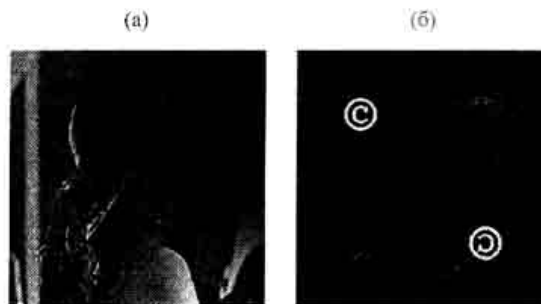


Рис. 3. Восстановление водяного знака при искажении изображения-носителя тенью: а – изображение-носитель, искаженное тенью, б – результат восстановления водяного знака.

5. Результаты экспериментов

Процедура создания голограммы и ее встраивание в изображение-контейнер осуществлялись с помощью специально разработанного программного пакета "WM-Embedding". В программном пакете реализован метод голограммы Фурье с ОБП (раздел 4). Размер изображения-контейнера составлял 256×256 пикселей, а размер ВЗ равнялся 32×32 пикселей. Результирующее изображение со скрытым ВЗ выводилось на фотоприинтер и затем регистрировалось на фотобумаге. В качестве фотоприинтера использовалась типовая мини-фотолаборатория Gretag NetPrinter-812. Размер фотографий равнялся 4,3×4,3 см, а пространственная плотность записи была равна 300 dpi.

Обратная процедура восстановления ВЗ включает в себя сканирование фотоотпечатка, содержащего скрытый ВЗ. Сканирование выполнялось с помощью сканера DUOSCAN T1200-Agfa. Плотность пространственных отсчетов составляла 600 dpi. Восстановление водяных знаков осуществлялось с помо-

щения ВЗ из голограммы достаточно выполнить преобразование Фурье или только вещественной, или только мнимой части комплексной голограммы.

Экспериментальные исследования на типовом оборудовании показали устойчивое восстановление ВЗ для фурье-голограмм. Наилучшие результаты были получены для фурье-голограмм без рассеивателя. Эти голограммы хорошо противостоят как влиянию ФПМ сквозного тракта, так и случайным геометрическим искажениям, связанным со смещением, поворотом и изменением масштаба фотоизображений. Основным недостатком голограмм без диффузора является наличие аномальных возмущений в картинке-носителе.

Наименьшие возмущения получаются в случае применения голограммы с рассеивателем. Эти голограммы устойчивы к влиянию ФПМ сквозного тракта, однако более чувствительны к случайным геометрическим искажениям, перечисленным выше. Это связано с появлением пятнистой структуры (спеклов), которая обусловлена флуктуациями фазы. Основной подход для уменьшения влияния спеклов состоит в апостериорной обработке изображений.

Процесс внедрения голограммы ВЗ в фотографию может быть реализован на стационарном оборудовании. Для обратного процесса (восстановления ВЗ) достаточно выполнить двумерное фурье-преобразование. Этот процесс желательно осуществлять оперативно с помощью устройств, работающих в реальном времени. Для этого можно использовать цифровые процессоры обработки сигналов. Цифровые процессоры фирмы Texas Instruments (серия TMS320) позволяют выполнять двумерное преобразование Фурье матрицы 256×256 пикселей за время менее 0,2 с.

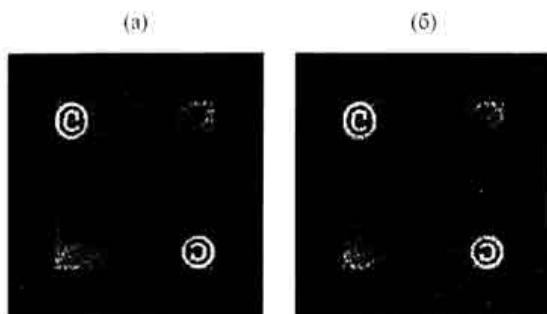


Рис. 4. Результат восстановления водяного знака "copyright" после выполнения процедур фотопечати и сканирования на типовом оборудовании: а – без рассеивателя, б – с рассеивателем.

стью разработанного программного пакета "WM-Restoration". На рис. 4 показаны результаты восстановления ВЗ для двух случаев. В первом случае (рис. 4а) применялась голограмма ОБП без рассеивателя, а во втором (рис. 4б) – голограмма ОБП с рассеивателем.

Заключение

Применение голографического подхода позволило дать физическую интерпретацию процессов встраивания и восстановления ВЗ. Установлено, что фурье-преобразование ВЗ, встраиваемых в частотной области со сдвигом относительно центра координат, представляет собой цифровую голограмму Фурье. Разработанный метод голограммы Фурье с ОБП значительно упрощает процессы внедрения и восстановления ВЗ. Показано, что для восстанов-

ЛИТЕРАТУРА

1. Van Schyndel R.G., Tirkel A.Z. and Osborne C.F. A digital watermark // Int. Conf. on Image Processing. 1994. V. IEEE 2. P. 86–90.
2. Cox I.J. and Linnartz J.-P. Some general methods for tampering with watermarks // IEEE Trans. on Selected Areas of Communications. 1998. V. 16. № 4. P. 587–593.
3. Грибунин В.Г., Оков И.Н., Туринцев И.В. Цифровая стеганография. М.: СОЛОН-Пресс, 2002. 272 с.
4. Herrigel A., O'Ruanaidh J., Petersen H., Pereira Sh. and Pun Th. Secure Copyright Protection Techniques for Digital Images // International Workshop on Information Hiding. Portland. OR. USA. April 1998.
5. O'Ruanaidh J.J.K. and Pun Th. Rotation, scale and translation invariant spread spectrum digital image watermarking // Signal Processing. 1998. V. 66. № 3. P. 303–317.
6. Pereira Sh., O'Ruanaidh J.J.K., Deguillaume F. Template Based Recovery of Fourier-Based Watermarks Using Log-

- polar and Log-log Maps // IEEE Int. Conf on Multimedia Computing and Systems (ICMCS'99). Florence, Italy. June 1999.
7. Lin Ch.-Y. Public Watermarking Surviving General Scaling and Cropping: An Application for Print-and-Scan Process // Multimedia and Security Workshop at ACM Multimedia 99. Orlando, FL, USA. October 1999.
8. Lin Ch.-Y. and Chang Sh.-F. Distortion Modeling and Invariant Extraction for Digital Image Print-and-Scan Process // Intern. Symposium on Multimedia Information Processing (ISMIP 99). Taipei, Taiwan. December 1999.
9. Kuttler M., Jordan F. and Bossen F. Digital watermarking of color images using amplitude modulation // Journal of Electronic Imaging. 1998. V. 7. № 2. P. 326–332.
10. Kuttler M. Watermarking resisting to translation, rotation, and scaling // Proc. of SPIE Intern. Symposium on Voice, Video and Data Communications. November 1998.
11. Федоров Б.Ф., Эльман Р.И. Цифровая голография. М.: Наука, 1976. 149 с.
12. Holography / Ed. by J.W. Goodman // Proc. of the IEEE. 1971. V. 59. № 9. Перевод: Применение голографии. Сборник статей под ред. Дж. Гудмена. М.: Мир, 1973. 78 с.
13. Ярославский Л.П., Мерзляков Н.С. Цифровая голография. М.: Наука, 1982. 220 с.
14. Develis J.B. and Reynolds G.O. Theory and Application of Holography. Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, 1967.
15. Andrews H. Computer Techniques in Image Processing. New-York-London: Academic Press, 1970.
16. Smirnov M.V., Korolev A.N., Sivjakov I.N., Zvezdin D.I. Method and software of automatic resolution evaluating of optic-electronic telescopic land remote sensing system // Proc. SPIE. 1996. V. 2753. P. 124–133.
17. Huang Th.S. Digital Holography // Proc. IEEE. 1971. V. 59. P. 1335–1345.
18. Смирнов М.В. Метод преобразования Гильберта для восстановления фазового распределения по интерференционной картине // ОМП. 1992. № 4. С. 26–28.