

多重虚拟三维物体菲涅耳全息水印方法^①

陈家祯, 郑子华, 叶 锋, 连桂仁, 许 力

(福建师范大学 数学与计算机学院, 福州 350007)

摘 要: 提出一种基于菲涅耳全息变换和 OFDM 的多重虚拟三维物体水印实现方法, 首先利用快速卷积算法分别计算观测面上单个虚拟三维物体的菲涅耳衍射分布, 然后结合 OFDM 原理通过串并转换、共轭对称、IFFT 和并串转换处理实现多个三维物体实值编码计算全息水印信号的设计; 水印信号嵌入在载体文件小波域的水平垂直分量, 通过修改小波系数邻域平均值隐藏信息, 并能实现盲提取. 仿真实验结果表明, 所提出的方法对剪切、滤波、JPEG 压缩等攻击表现出较强的稳健性, 特别是具有良好的抗剪切性能.

关键词: 菲涅耳计算全息; 正交频分复用; 虚拟三维物体; 数字再现; 数字水印

Method on Fresnel Holographic Watermark of Multiple Virtual Three-Dimensional Objects

CHEN Jia-Zhen, ZHENG Zi-Hua, YE Feng, LIAN Gui-Ren, XU Li

(School of Mathematics and Computer Science, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China)

Abstract: A watermark method on Fresnel hologram transformation and OFDM for multiple three-dimensional objects has been proposed. First, the fast convolution algorithm is used to calculate the Fresnel diffraction distribution of the single virtual three-dimensional object in the observed plane. Then, combining with OFDM principle procedures such as parallel-serial conversion, conjugate symmetry, IFFT and parallel-serial conversion are followed to design real coding computer-generated holographic watermark. Watermark signal is embedded in the horizontal and vertical detail components of the wavelet domain by changing neighbor wavelet coefficient to hide information and the watermark can be blind extracted. The simulation results show that the approach behaves good robustness on cropping, filtering, JPEG compression, etc. Especially the approach shows good performance for cropping operation.

Key words: Fresnel computer-generated hologram (CGH); OFDM; virtual three-dimensional object; digital reconstruction; digital watermark

数字作品如图像、音频、视频等是当今信息化社会信息保存、传输、处理和通信的重要形式, 用于为数字作品提供版权保护的数字水印和信息隐藏技术也得到充分重视和研究. 近年来, 虚拟光学概念和方法被引入到信息隐藏和数字水印领域, 实现算法中光信号传播规律与光信号处理系统的几何结构参数等的结合应用可带来安全性、稳健性和设计灵活性等方面的优势. 基于虚拟光学理论和方法的数字水印及信息隐藏应用成果之一是全息水印信号的设计, 结合各类全息图所携带的消息特征, 众多学者对全息水印技术作

了充分研究并取得一定成果, 如 2002 年, Taikai 等首先提出傅里叶数字全息水印思想^[1]; 2005 年 Chang 等人改进了 Taikai 等人的方法提出一种基于离散余弦变换的数字全息水印技术^[2], 2006 年尉迟亮等提出了基于 JPEG 模型的数字全息水印嵌入方法^[3], 2006 年位恒政等在上述基础上提出基于菲涅耳变换的数字全息水印, 结合衍射距离和波长参数, 扩展了嵌入变换平面^[4], 2010 年陈木生结合小波和光学菲涅耳变换提出水印算法^[5], 2013 年马建设、任振波等作者提出一种基于层析法的多重计算全息水印技术^[6], 通过计算不同层面

^① 基金项目:福建省教育厅 B 类项目(JB11020)

收稿时间:2014-12-15;收到修改稿时间:2015-02-02

上水印信息的菲涅耳衍射实现水印信息的立体化与多重化,其实质是单个虚拟三维物体在载体文件中的嵌入问题,但单个虚拟三维物体的不同层面上的水印信息只能通过衍射距离加以区分,未能充分利用波长这一计算参数,另外水印信息集中于单个三维物体也不利于分散各类攻击对各个层面数字再现所造成的影响.为解决这个问题,本文在虚拟三维物体菲涅耳计算全息的基础上结合 OFDM 原理提出多重虚拟三维物体水印方法,水印信号可分布于多个三维物体的不同层面,不同三维物体菲涅耳衍射计算参数独立,当将计算参数作为密钥使用时,意味着可使用密钥组数的增加,能够更好地服务于多用户共享版权时的水印信号独立或联合提取.结合小波域嵌入与提取方法,实现了水印信号的盲提取,仿真实验结果表明所提出的方法在抗剪切、滤波方面表现出良好性能,在抗 JPEG 压缩、抗拉伸等方面也表现出一定的稳健性,另外各个三维物体在数字重构过程中所用的波长、衍射距离等参数可用作密钥,具备更高安全性.

1 三维物体菲涅耳衍射原理

理想三维物体可看作是由一系列相互平行的截面组成,观测面物光波与三维物体各截面物光波之间的关系如图(1)所示.

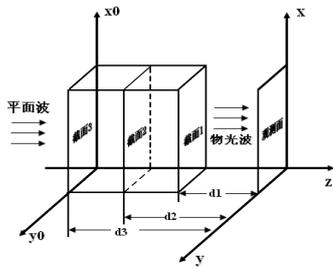


图 1 观测面与三维物体初始截面之间的关系

设各截面物光波的复振幅分布为 $f_i(x_0, y_0)$, 截面距观测面的距离为 d_i , 当物体与观测面之间的距离满足菲涅耳衍射条件, 观测面处的光波分布是各截面物光波菲涅耳衍射分布之和^[7]. 三维物体菲涅耳计算全息水印信号的制作建立在离散物光波基础上, 观测面物光波分布可用离散菲涅耳变换来表示. 用 $O(m', n')$ 表示观测面物光波复振幅分布, 则 $O(m', n') = \sum_{i=1}^L o_i(m', n')$, L 表示截面个数, 其中第 i 个

截面离散物光波在观测面的菲涅耳衍射分布 $o_i(m', n')$ 可表示为:

$$o_i(m', n') = \frac{\exp(jkd_i)}{j\lambda d_i} \exp[-\frac{jk}{2d_i}((m'\Delta x)^2 + (n'\Delta y)^2)] \times \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} f_i(m\Delta x_0, n\Delta y_0) \exp[\frac{jk}{2d}((m\Delta x_0)^2 + (n\Delta y_0)^2)] \exp[-j2\pi(\frac{mm'}{M} + \frac{nn'}{N})] \quad (1)$$

($0 \leq m \leq M - 1$, $0 \leq n \leq N - 1$, $0 \leq m' \leq M - 1$, $0 \leq n' \leq N - 1$)

式(1)中 λ 表示波长, $k = 2\pi/\lambda$, Δx_0 , Δy_0 表示截面 $f_i(x, y)$ 沿 x_0 和 y_0 方向采样间隔, Δx , Δy 表示衍射面采样间隔, 根据 Shannon 定理, $\Delta x_0 = \frac{\lambda d_i}{M\Delta x}$, $\Delta y_0 = \frac{\lambda d_i}{N\Delta y}$. 式(1)中 $o_i(m', n')$ 是关于离散截面 $f_i(m\Delta x_0, n\Delta y_0)$, 波长 λ 和距离 d_i 的函数, 用 $F_{(d)}(f_i(m\Delta x_0, n\Delta y_0), \lambda, d_i)$ 表示, 则三维物体在观测面物光波分布也可表示为:

$$O(m', n') = \sum_{i=1}^L F_{(d)}(f_i(m\Delta x_0, n\Delta y_0), \lambda, d_i) \quad (2)$$

式(1)的计算存在一次快速傅里叶变换及快速卷积算法^[8],

定义菲涅耳衍射传递函数 $H_F(f_x, f_y) = \exp\{jkd[1 - \frac{\lambda^2}{2}(f_x^2 + f_y^2)]\}$, 可按式(3)用快速卷积算法计算三维物体在观测面的衍射分布,

$$O(m', n') = \sum_{i=1}^L F_d(f_i(m\Delta x_0, n\Delta y_0), \lambda, d_i) = \sum_{i=1}^L F^{-1}\{F[f_i(m\Delta x_0, n\Delta y_0)]H_F(m\Delta x, n\Delta y)\} \quad (3)$$

2 基于OFDM的多三维物体水印信号制作原理

2.1 多三维物体水印信号 OFDM 复用原理

为了能够在载体文件中嵌入多个三维物体实现多重水印, 通过复用方法使水印信号能够携带多个三维物体信息, 信号的基本复用方法有时分复用(TDM)、频分复用(FDM)和码分复用(CDM)等. OFDM(正交频分复用)是多载波调制技术^[9]的一种, 广泛应用于高速无线通信系统, 能有效克服无线信道中的频率选择性衰落. 对衍射光波信号应用 OFDM 一方面可以实现信号的复用, 另一方面 OFDM 中数据的串并处理能分散各

类攻击对各层面水印信息再现的影响。

每个 OFDM 信号是多个经过调制的子载波信号之和，用 N_c 表示子信道个数， f_c 表示载波频率， $O_i(x, y)$ 表示分配给每个子信道的衍射光波信号，设按 x 方向并行处理， $x = x_s$ 开始的三维物体衍射光波 OFDM 信号可以表示为：

$$S(x, y) = \sum_{i=-\frac{N_c}{2}}^{\frac{N_c}{2}-1} O_{i+\frac{N_c}{2}}(x, y) \exp[j2\pi(f_c - \frac{i+0.5}{\Delta x})(x - x_s)] \quad (4)$$

为了提高计算效率，用 IFFT 计算(4)式 OFDM 编码值，但由于三维物体菲涅耳衍射分布及 IFFT 的计算结果是复数，为了得到实值编码的计算全息水印信号，利用傅里叶变换的性质，对各路并行数据先作共轭对称^[10]再作 IFFT。基于 OFDM 的多个三维物体实值编码多重水印信号原理框图如图 2 所示。图中 $O(m', n')$ 和 $O'(m', n')$ 分别代表串行输入的衍射光波信号和经 OFDM 复用后的衍射光波信号。

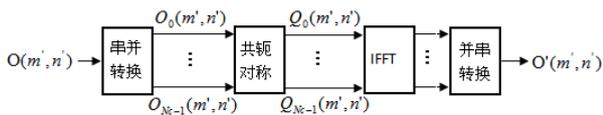


图 2 基于 OFDM 的实值编码多重水印信号原理框图

将得到的实值编码全息水印信号写成数字图像文件并用作水印信号嵌入到载体文件。

2.2 三维物体数字重建过程

多三维物体计算全息水印的提取过程可分为三步，第一步是从嵌入水印的宿主文件中提取经 OFDM 复用后的多三维物体计算全息水印，第二步是从复用的 OFDM 信号中分离出各个三维物体的菲涅耳衍射光波，第三步是计算离散菲涅耳逆变换数字重建三维物体。三维物体衍射光波恢复方法如图 3 所示。



图 3 三维物体衍射光波恢复方法

对第 i 个三维物体，可根据(5)式用提取的三维物体物光波数据 $o_i(m', n')$ 恢复各截面信息。

$$f_i(m\Delta x_0, n\Delta y_0) = IFFT\{o_i(m', n') \times \frac{\exp(-jk d_i)}{-j\lambda d_i} \times \exp\{\frac{-jk}{2d_i}[(m'\Delta x)^2 + (n'\Delta y)^2]\} \times \exp\{\frac{-jk}{2d_i}[(m\Delta x_0)^2 + (n\Delta y_0)^2]\} \quad (5)$$

3 多重三维物体全息水印信号嵌入与提取方法

3.1 水印嵌入方法

为了将水印信号嵌入到宿主图像，并能实现盲提取，对宿主图像进行多分辨率小波变换，将图像分解为不同空间、不同频率的图像。图像经过小波变换被分解为近似分量 cA，水平细节分量 cH，垂直细节分量 cV 和对角线细节分量 cD。综合考虑透明性和稳健性，将水印信息叠加在 cH 和 cV 分量，利用邻域平均值修改 CH 和 CV 分量小波系数达到信息隐藏的目的，具体方法为：

1) 将 cH, cV 按 2*2 大小分块，定义左上角顶点为嵌入点，其他 3 点为邻点，定义邻域系数平均值

$$ave_k = \frac{1}{3} [\sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^2 x_k(i, j) - x_k(1,1)] \quad (6)$$

2) 嵌入后小波系数 $x'_k(1,1) = ave_k + \alpha H_k$ ， α 为嵌入深度因子， α 越大鲁棒性越高，但对载体图像质量的影响越大。

3) 将系数作部分修改后的 cH', cV' 与原有的 cA, cD 作离散小波逆变换，得到包含水印信息的正实值图像 I_w 。

$$I_w = idwt2(cA, cH', cV', cD, 'wname') \quad (7)$$

3.2 计算全息水印信号提取方法

将含有水印的图像 I_w 作二维离散小波变换，

$$[cA, cH, cV, cD] = dwt2(I_w, 'wname') \quad (8)$$

对 cH, cV 按嵌入时的分块方法和邻域定义计算邻域系数平均值。

$$ave'_k = \frac{1}{3} [\sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^2 x'_k(i, j) - x'_k(1,1)] \quad (9)$$

再按 $H_k = (x'_k(1,1) - ave'_k) / \alpha$ ，计算出第 k 个分块所嵌入的水印值，在提取水印时不需要原始图像信息，实现了盲水印提取。对提取出的水印信号再按多三维物体数字重建过程再现原始三维物体各截面信息。

4 实验仿真结果与讨论

4.1 实验仿真结果

图 4(a)和(b)分别代表三维物体 1 和 2 的三个截面, 每个截面为 128*64 像素点大小 256 色灰度图像, 水印信息分布于各个截面. 两个三维物体的菲涅耳全息水印信号制作参数各自独立, 三维物体 1 的模拟波长取 532nm, 三个截面距全息面的距离分别取 1500mm, 1700mm, 1900mm; 三维物体 2 的相应的四个参数为 632nm, 2000mm, 2100mm, 2200mm, 得到图 5 所示的三维物体 1 和三维物体 2 的菲涅耳衍射场幅度与相位分布, 大小为 128*64 点. 由菲涅耳衍射场计算衍射距离处三维物体截面恢复信号如图 6 所示. 对所得到的两个三维物体的菲涅耳衍射分布再按 2.1 节四路并行 OFDM 复用方法, 得到图 7 所示的实值编码三维物体 OFDM 计算全息水印信号, 大小为 258*132 像素点.

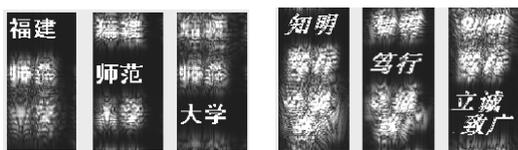


图 4 三维物体 1 和三维物体 2 的截面图



(a)三维物体 1 的菲涅耳衍射场幅度和相位分布
(b)三维物体 2 的菲涅耳衍射场幅度和相位分布

图 5 三维物体 1 和三维物体 2 的菲涅耳衍射幅度和相位分布



(a)三维物体 1 的截面恢复信号
(b)三维物体 2 的截面恢复信号

图 6 三维物体 1 和三维物体 2 的截面恢复信号



图 7 实值编码 OFDM 三维物体菲涅耳全息水印信号

原始载体图像 1024*1024 像素大小, 如图 8 所示. 在载体图像的水平垂直和细节分量按 3.1 节所述方法嵌入经 OFDM 复用后的实值编码全息水印信号, 得到水印图像如图 9 所示. 本实验中当嵌入强度 α 取 0.7 时, 计算原始载体图像与嵌入水印后的图像之间的 PSNR= 46.3793, 人眼未能明显感觉两者之间的差异, 具有良好的透明性. 从水印图像按前文 3.2 和 2.2 节方法提取全息水印信号, 如图 10 所示. 为衡量原始全息水印信号(图 7)与提取后的全息水印信号(图 10)在图像质量上的相似程度, 计算两者的 PSNR、MSE 和归一化相关系数 NCC 分别为: 65.0170, 0.0228 和 0.9950. 对提取的全息水印信号代入制作参数计算再现像, 图 11 是三维物体不同重建平面上当波长、衍射距离等重建参数与记录参数相符时的再现像, 可以看出对三维物体的某一截面, 只有重现参数与记录参数相符时, 才能清晰再现该截面上物体信息, 否则只能得到模糊的衍射像, 与三维显示特点相符合.



图 8 原始载体图像 图 9 水印图像



图 10 从水印图像中恢复的计算全息水印信号

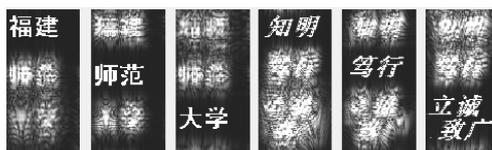


图 11 从提取的全息图中恢复的截面信号

4.2 算法稳健性测试

4.2.1 抗剪切性能

三维物体 OFDM 复用中并行处理及 IFFT 运算使水印图像具有良好的抗剪切性能, 图 12(a)、(b)、(c)和(d)给出了水印图像不同程度剪切后的三维物体截面恢复信号, 可以看出, 虽然载体图像遭受大面积破坏, 但三维物体各截面的信息仍可分辨出。

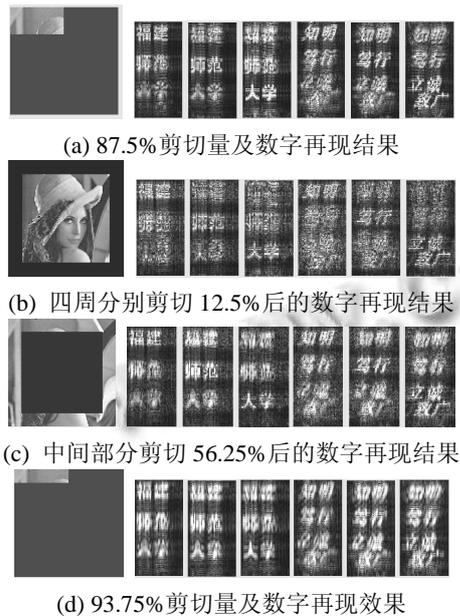


图 12 抗剪切性能

4.2.2 抗 JPEG 压缩性能

对载体图像进行 JPEG 压缩, 压缩因子分别取 0.9 和 0.75 时, 得到图 13 所示再现结果, 说明算法具有一定的抗 JPEG 能力。

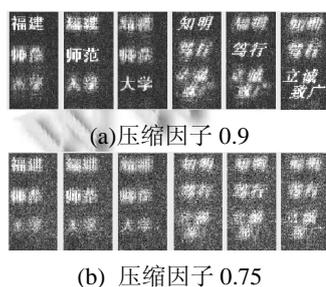


图 13 抗 JPEG 压缩性能

4.2.3 抗拉伸性能

对水印图像先作 3/4 压缩后再拉伸, 提取的水印信号如图 14 所示, 说明水印图像具有一定抗拉伸能力。

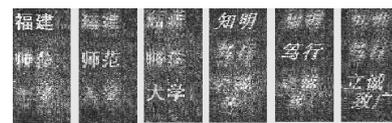


图 14 抗拉伸性能

4.2.4 抗滤波性能

对水印图像分别应用拉普拉斯滤波器、模糊对比增强滤波器及高斯低通滤波器进行滤波后, 仍可清晰再现三维物体各截面信息。

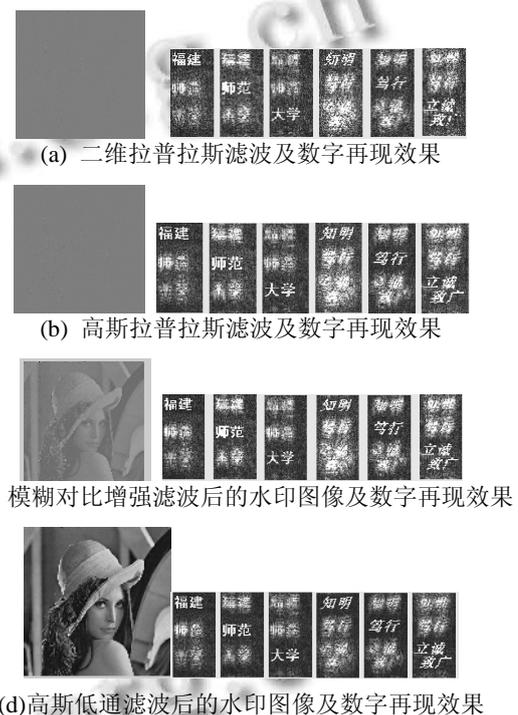


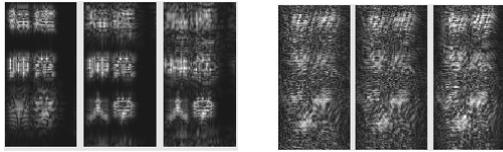
图 15 抗滤波性能

4.3 数字重现参数灵敏度

三维物体各截面水印信号的数字重建通过计算离散菲涅耳逆变换实现, 正确的光波衍射计算参数才能清晰数字重建截面水印信号, 若重建参数出现偏差, 截面信息将变模糊, 因此衍射计算参数具有密钥的特征。图 16(a)是三维物体 1 的各截面计算参数中再现距离出现+100mm 偏差时的数字再现结果, 图 16(b)是三维物体 2 的各截面计算参数中波长出现-80nm 偏差时的数字再现像。可以看出当参数偏离到一定程度后, 截面水印信号将无法清晰重建。

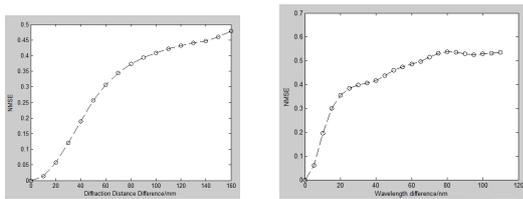
用均一化误差(NMSE)作为三维物体截面信息提取质量的衡量标准^[11], 以三维物体 1 截面 1 的数字再现为例, 当波长、衍射距离出现偏差时的 NMSE 变化

曲线如图 17(a)(b)所示。



(a)100mm 再现距离偏差 (b)-100nm 波长偏差

图 16 三维物体 1 和三维物体 2 的再现参数出现偏差时的数字再现结果



(a)距离偏差与 NMSE 之间的关系

(b) 波长偏差与 NMSE 之间的关系

图 17 衍射距离及波长偏差与 NMSE 之间的关系

从两图变化曲线可以看出, NMSE 将随着参数偏差的增大而增加, 相应截面信息也将由清晰变得模糊直至无法辨识, 本文中三维物体 1 和 2 的截面再现计算参数的灵敏度如表 1 所示。

表 1 参数灵敏度

参数灵敏度	三维物体1	三维物体2
波长(nm)	70	60
衍射距离(m)	0.1	0.1

4.4 与使用单个三维物体截面隐藏水印方法的对比

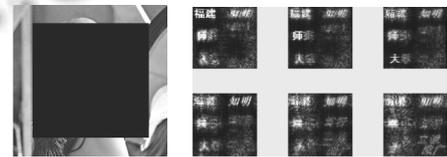
4.4.1 抗剪切性能比较

文献[6]使用单个三维物体的不同层面实现水印信息的隐藏, 为便于比较, 按文献中的方法在单个三维物体中构建 6 个截面, 每个截面大小为 128*128 像素点, 截面信息如图 18 所示, 对各截面按波长 532nm, 衍射距离分别为 1500mm, 1600mm, 1700mm, 1800mm, 1900mm,1900mm 和 2000mm 计算三维物体在观测面上的菲涅耳衍射分布, 并取幅值(128*128 点)和相位(128*128 点)用作水印信号, 所嵌入水印的大小与本文方法相当; 采用相同的嵌入与提取方法, 在透明性相当的情况下进行稳健性比较, 以抗剪切性为例, 在对水印图像进行相同的剪切时, 数字再现结果如图 19 所示, 可以看出当剪切量为 93.75%时, 文献中方法对大部分截面信息已无法辨识. 而经 OFDM 复用后的水印

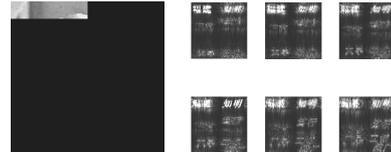
信息由于分散到两个三维物体以及 OFDM 复用计算中的并行处理对抗剪切性有较明显的改善作用, 特别是在水印图像遭受大面积剪切的情况下本文算法优势更明显。



图 18 三维物体的截面信息



(a) 四周分别剪切 12.5%后的数字再现结果



(b) 93.75%剪切量及数字再现效果

图 19 水印图像不同程度剪切后的数字再现效果

4.4.2 抗 JPEG 压缩性能比较

在 JPEG 压缩因子相同的情况下计算文献[6]与本文方法下的恢复水印与原始水印之间的 NMSE, 得到图 20 所示比较曲线, 可以看出在相同的压缩因子下本文方法中的 NMSE 更小, 相应恢复的截面信息也将更清晰。

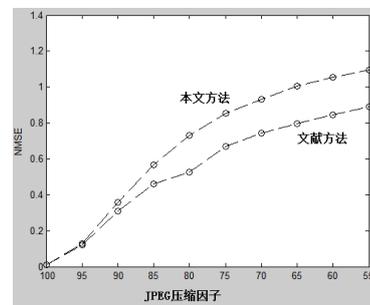


图 20 不同压缩因子下的 NMSE 比较

实验结果表明, 本文方法在抗剪切性、JPEG 压

缩、高斯低通滤波方面与文献中的方法相比表现出一定的优势,在抗拉伸、拉普拉斯滤波等方面性能相当。此外文献[6]中方法只有与单个三维物体相对应的 1 组波长和衍射距离参数可供利用,而本文方法中可利用的波长与衍射距离参数的组数与三维物体的个数相同,并且各组计算参数相互独立,因此密钥空间可更灵活。

5 结语

将菲涅耳变换与 OFDM 原理相结合实现多个虚拟三维物体信息在同一张全息图上的记录,并将该全息图作为水印信号嵌入到载体图像实现了三维物体的信息隐藏^[12],使水印信号从一般的一维、二维信号形式延拓至三维物体,扩展了水印嵌入信号的类型;通过载体图像小波域的水平 and 细节分量的修改实现了水印信号的嵌入与盲提取,实用性强。仿真测试结果表明,所提出的方法具有较好的透明性,在抗剪切、JPEG 压缩、抗拉伸、滤波等方面表现出较强的稳健性,特别在抗剪切及滤波方面表现出优良性能。菲涅耳全息变换的引入及制作参数如波长、再现距离对数字再现的约束关系使得所提出的方法可满足多用户共享版权时的同等版权认证、独立提取和联合认证并具备更高的安全性,另外菲涅耳变换与 OFDM 的结合应用也为多重水印信号的设计提供了一种新的解决问题的思路。

参考文献

- 1 Takai N, Mifune Y. Digital watermarking by a holographic technique. *Appl Opt.* 2002, 41(5): 865–873.
- 2 Chang H, Tsan C. Image watermarking by use of digital holography embedded in discrete-cosine-transform domain. *Allpied Optics*, 2005, 44(29): 6211–6219.
- 3 尉迟亮,顾济华,刘薇,陶智.基于数字全息及离散余弦变换的图像数字水印技术. *光学学报*,2006,26(3):355–361.
- 4 位恒政,彭翔,张鹏.基于菲涅耳数字全息的水印技术. *系统仿真学报*,2007,19(22): 5351–5354,5360.
- 5 陈木生.菲涅耳数字全息在图像加密中的应用. *激光与红外*,2010,40(2): 223–226.
- 6 马建设,任振波,苏萍,夏飞鹏.多重计算全息水印技术. *光学精密工程*,2013,21(8):2111–2119.
- 7 于美文. *光全息学及其应用*.北京:北京理工大学出版社,1996.
- 8 李俊昌,熊秉衡. *信息光学教程*.科学出版社,2011.
- 9 樊昌信,曹丽娜. *通信原理*.北京:国防工业出版社,2007.
- 10 黄素娟,王朔中,于瀛洁.共轭对称延拓傅里叶计算全息. *物理学报*,2009,58(2):952–958.
- 11 黄清龙,刘建岚,陈瑾.用菲涅耳变换和相位密码板实现盲数字水印. *光电子激光*,2008,19(5):667–670.
- 12 刘会平,国伟.数字加网信息隐藏技术在隐秘保密通信中的应用. *计算机应用*,2014,34(9):2645–2649.