

一种安全的大容量量子图像水印协议

季 赛^{1,2}, 陈思怡¹, 瞿治国^{1,3}

(1. 南京信息工程大学 计算机与软件学院, 南京 210044; 2. 江苏省网络监控工程中心, 南京 210044;
3. 江苏省大气环境与装备技术协同创新中心, 南京 210044)

摘 要: 基于量子图像的柔性表示法, 提出一种安全的量子水印协议, 借助连分式算法以加强水印图像的不可见性。在协议执行过程中, 只有产权方才能提取和恢复水印, 既保证了水印图像安全, 又提供了有效的版权证明。实验结果表明, 相比传统水印协议, 该协议的水印图像尺寸达到最大, 并且嵌入容量提高了 8 倍, 能够更好地度量协议执行的计算负载性能。

关键词: 量子信息; 量子图像水印; 连分式算法; 不可见性; 大容量

中文引用格式: 季 赛, 陈思怡, 瞿治国. 一种安全的大容量量子图像水印协议[J]. 计算机工程, 2018, 44(5): 234-239.

英文引用格式: JI Sai, CHEN Siyi, QU Zhiguo. A Secure Quantum Watermark Protocol with Large Payload[J]. Computer Engineering, 2018, 44(5): 234-239.

A Secure Quantum Watermark Protocol with Large Payload

JI Sai^{1,2}, CHEN Siyi¹, QU Zhiguo^{1,3}

(1. School of Computer and Software, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China;
2. Jiangsu Engineering Center of Network Monitoring, Nanjing 210044, China;
3. Jiangsu Collaborative Innovation Center of Atmospheric Environment and Equipment Technology, Nanjing 210044, China)

[Abstract] Based on the Flexible Representation for Quantum Image (FRQI), a secure quantum watermark protocol is proposed. The new protocol is enhanced in invisibility by making full use of continued-fraction algorithm. It is impossible for anyone except the copyrighter to extract and recover the water image during the protocol execution, which ensures the security of the watermark image, while also providing effective copyright certificate. Simulation results show that compared with the traditional watermark protocol, the size of watermark image reaches the maximum value and the capacity of the new protocol is expanded to eight times that of the previous protocols, and it can better measure the performance of the computation load that is executed by the protocol.

[Key words] quantum information; quantum image watermark; continued-fraction algorithm; invisibility; high capacity
DOI: 10.19678/j.issn.1000-3428.0046925

0 概述

近年来, 随着量子安全通信技术的发展, 量子信息隐藏技术吸引越来越多的专家学者的关注和研究。量子水印作为信息隐藏的一个分支, 其主要思想就是将量子水印信息嵌入到各种公开的量子传输载体中, 在不影响原载体正常使用的前提下, 提供有效的产权证明。早期, 量子水印技术主要通过单粒子或多粒子量子载体运用量子秘密通信特征完成量子水印。文献[1]基于 BB84 协议提出第一种量子

水印协议。文献[2]利用 Bell 基纠缠交换完成量子水印嵌入和提取。文献[3]在文献[2]基础上进行完善, 能够抵抗常见的量子攻击。近年来随着图像的量子表示的提出, 量子图像水印也得到发展。文献[4]首次提出基于受限几何变换的量子图像水印及认证协议 (WaQI)。随后在图像的量子表示基础和 WaQI 基础上, 许多量子水印协议被相继提出^[5-9]。文献[10]基于量子傅里叶变换 (QFT) 提出一种强健的水印策略, 借助傅里叶变换的性质保证水印图像能够抵抗无法避免的噪音和裁剪, 从而确

基金项目: 国家自然科学基金 (60772072, 61373131, 61303039, 61232016, 61501247); 江苏高校优势学科建设工程项目 (PAPD); 南京信息工程大学江苏省大气环境与装备技术协同创新中心项目 (CICAEET)。

作者简介: 季 赛 (1976—), 男, 副教授, 主研方向为图形图像处理、计算机测控、网络安全; 陈思怡, 硕士; 瞿治国 (通信作者), 讲师、博士。

收稿日期: 2017-04-24

修回日期: 2017-06-12

E-mail: qzghhh@126.com

保载体图像的视觉效果,但没有说明如何通过具体量子线路来进行水印图像嵌入和提取。针对此漏洞,文献[11]进行了改进。之后,文献[12]提出一种基于量子小波变换(QWT)的新颖水印策略和一种基于Hadamard变换的新颖水印策略^[13]。但是,文献[12]中水印嵌入和提取并不符合量子力学原理,因此对其进行改进,提出了文献[14]。此外基于FRQI,文献[15-16]提出一种用于编译彩色量子图像的多频道量子图像的表示(MCQI)。文献[17]基于MCQI提出多信道量子图片的双水印策略(MC-WaQI),结合双密钥和双领域加强量子图像保护,仿真结果显示比之前单信道FRQI的保真度要高。

总体来说,现有的量子图像水印协议中仍存在不完善的地方。例如,文献[4]中嵌入的水印图像远小于载体图像,且该协议不能找出真正的产权方。文献[12-13]仅适用单色图像且违背了量子力学原理,而在文献[14]中虽然提出了相应的改进措施,但并没有进行仿真实验证明其有效性。针对上述问题,本文提出一种安全的大容量量子水印协议。新协议能够根据从载体图像中提取的水印找出谁是真正的水印嵌入者。而且,新协议的水印图像尺寸达到与载体图像同样大小,并将文献[12-13]中适用的单色图像拓展到8进制的灰色图像。此外,本文不仅设计出相应的量子线路,还给出相应的计算复杂度。

1 预准备

1.1 量子图像的灵活表示

文献[18]提出一种灵活的量子图像表示法,称为FRQI。FRQI包含基本的灰度图像信息,即图像每个像素点的颜色信息和位置信息。其定义如下:

$$I(\theta) = \frac{1}{2^n} \sum_{i=0}^{2^{2n}-1} |c_i\rangle \otimes |i\rangle \quad (1)$$

其中:

$$|c_i\rangle = \cos\theta_i |0\rangle + \sin\theta_i |1\rangle \quad (2)$$

$$\theta_i \in [0, \frac{\pi}{2}], i=0, 1, \dots, 2^{2n}-1 \quad (3)$$

其中, θ 是编译颜色信息, $|i\rangle$ 是二维量子态,用来表示像素点位置信息。对二维图像来说,位置信息 $|i\rangle$ 包含2个部分:

$$|i\rangle = |y\rangle |x\rangle = |y_{n-1}y_{n-2}\dots y_0\rangle |x_{n-1}x_{n-2}\dots x_0\rangle \quad (4)$$

$$x_j, y_j \in \{0, 1\} \quad (5)$$

对每个 $j=0, 1, \dots, n$, $|y_{n-1}y_{n-2}\dots y_0\rangle$ 编译各像素点纵坐标, $|x_{n-1}x_{n-2}\dots x_0\rangle$ 编译各像素点横坐标。

1.2 协议总流程

为了便于理解新协议的执行步骤,本节给出新

协议的总流程,如图1所示。本文协议的总流程一共包含4个阶段:置乱,嵌入,提取和恢复。产权方首先在预处理阶段根据随机序列 M, N 对水印图像进行置乱,将其变成混乱图像;接着根据密钥 k_i 将置乱后的水印图像嵌入到载体图像中;之后产权方由自己掌握的原载体图像和密钥从含水印的载体图像中提取出混乱的水印图像,并最终恢复成初始的水印图像。

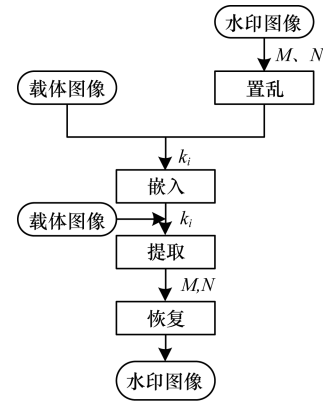


图1 协议总流程

2 量子水印协议

2.1 置乱

本文协议在嵌入水印图像之前,置乱水印图像将其变成混乱图像,使攻击者无法辨别水印图像,提高协议的安全性。文献[10]给出了一种量子图像置乱方法。假设水印图像大小为 $m \times n$,产生2组随机序列 M, N ,大小分别为 m, n 。 $M(i)$ 代表序列 M 中第 i 位信息, $N(j)$ 代表序列 N 中第 j 位信息。具体置乱时,位置 $(M(i), N(j))$ 上的颜色信息代替原图像位置 (i, j) 上的颜色信息。将所有位置的颜色信息全部更改后,原水印图像变成混乱的图像。

这里用 4×4 图像举例。给出随机序列 $M=3, 0, 1, 2; N=1, 3, 0, 2$ 。这里的 M, N 只有产权方知晓。置乱后原先字母顺序已经被重新组合为“H E F G P M N O D A B C L I J K”,如图2所示,相应的量子线路如图3所示。

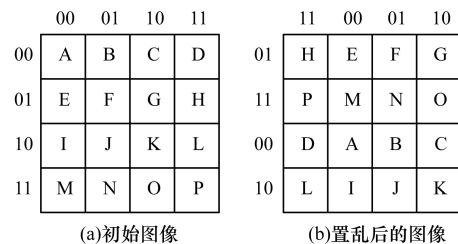


图2 4×4 图像置乱

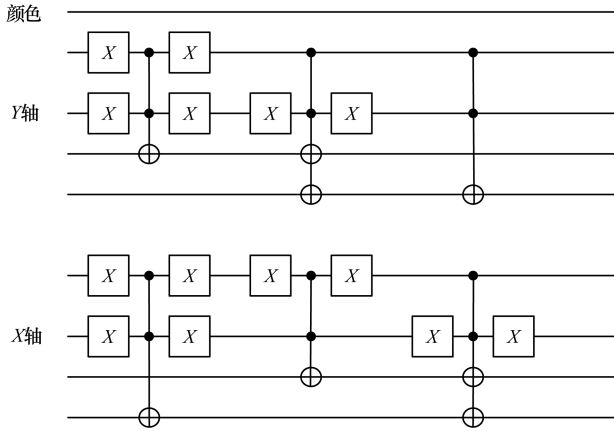


图3 4×4 图像置乱的量子线路

2.2 嵌入

根据 2.1 节 FRQI 的介绍,量子灰度图像中每个像素值可以写为 $I(\theta) = \cos \theta |0\rangle + \sin \theta |1\rangle$, 其中 θ 表示编译像素点的颜色信息。参考文献[10], 只考虑图像颜色信息时,本文协议载体图像可写为:

$$\bigotimes_{i=0}^{2^{2n}-1} I_c(\theta_i) = \bigotimes_{i=0}^{2^{2n}-1} (\cos \theta_i |0\rangle + \sin \theta_i |1\rangle) \quad (6)$$

水印图像可写为:

$$\bigotimes_{i=0}^{2^{2n}-1} I_w(\varphi_i) = \bigotimes_{i=0}^{2^{2n}-1} (\cos \varphi_i |0\rangle + \sin \varphi_i |1\rangle) \quad (7)$$

其中, i 代表像素点位置信息, θ_i 和 φ_i 各自代表载体图像和水印图像各像素点的颜色信息,水印图像与载体图像大小相同。

下面介绍具体的嵌入步骤:

1) 产权方产生一串密钥 k_i , 用来决定水印图像嵌入的位置。当 $k_i=0$ 时,水印信息嵌入到载体像素颜色信息的余弦部分;当 $k_i=1$ 时,水印信息嵌入到载体像素颜色信息的正弦部分。这里的 k_i 只有产权方知晓。

2) 产权方按连分式算法将载体图像中代表各像素点颜色信息的三角函数值以连分数的形式表示,再根据密钥 k_i 和水印图像信息对相应的连分数在一定精度内进行细微改动,将水印图像嵌入载体图像中。 $\cos x$ 和 $\sin x$ 的连分式可以写为:

$$\cos x = a_0 + \frac{1}{a_1 + \frac{1}{a_2 + \frac{1}{\dots + \frac{1}{a_{n-1} + \frac{1}{a_n + \dots}}}}} \quad (8)$$

$$\sin x = b_0 + \frac{1}{b_1 + \frac{1}{b_2 + \frac{1}{\dots + \frac{1}{b_{n-1} + \frac{1}{b_n + \dots}}}}} \quad (9)$$

其中, a_1, a_2, \dots, a_n 和 b_1, b_2, \dots, b_n 为正整数 ($a_0=0, b_0=0$), $x \in [0, \frac{\pi}{2}]$ 。

当 $k_i=0$ 时,原载体图像第 i 个像素值可以近似写为 $\alpha_i |0\rangle + \beta_i |1\rangle$, 其中:

$$\alpha_i = \cos \theta_i = \frac{1}{a_{i1} + \frac{1}{a_{i2} + \frac{1}{a_{i3} + \frac{1}{a_{i4}}}}}, \beta_i = \sqrt{1 - \alpha_i^2} \quad (10)$$

将置乱后的水印图像第 i 位像素值 φ_i 嵌入后:

$$\alpha_i' = \cos \theta_i' = \frac{1}{a_{i1} + \frac{1}{a_{i2} + \frac{1}{a_{i3} + \varphi_i'}}}, \beta_i' = \sqrt{1 - \alpha_i'^2} \quad (11)$$

当 $k_i=1$ 时,原载体图像第 i 个像素值可以近似写为 $\alpha_i |0\rangle + \beta_i |1\rangle$, 其中:

$$\beta_i = \sin \theta_i = \frac{1}{b_{i1} + \frac{1}{b_{i2} + \frac{1}{b_{i3} + \frac{1}{b_{i4}}}}}, \alpha_i = \sqrt{1 - \beta_i^2} \quad (12)$$

将置乱后的水印图像第 i 位像素值 φ_i' 嵌入后:

$$\beta_i' = \sin \theta_i' = \frac{1}{b_{i1} + \frac{1}{b_{i2} + \frac{1}{b_{i3} + \varphi_i'}}}, \alpha_i' = \sqrt{1 - \beta_i'^2} \quad (13)$$

3) 计算位差角: $\theta_i^r = \theta_i - \theta_i'$, 之后产权方对载体图像做统一的 $R_y(2\theta_i^r)$ 操作。这里, $R_y(2\theta_i^r) = \begin{pmatrix} \cos \theta_i^r & \sin \theta_i^r \\ -\sin \theta_i^r & \cos \theta_i^r \end{pmatrix}$ 。

4) 按照上述步骤完成每一位水印图像像素值的嵌入,得到最终含水印的载体图像:

$$\bigotimes_{i=0}^{2^{2n}-1} I_c(\theta_i') = \bigotimes_{i=0}^{2^{2n}-1} (\cos \theta_i' |0\rangle + \sin \theta_i' |1\rangle)$$

嵌入的量子线路如图 4 所示。

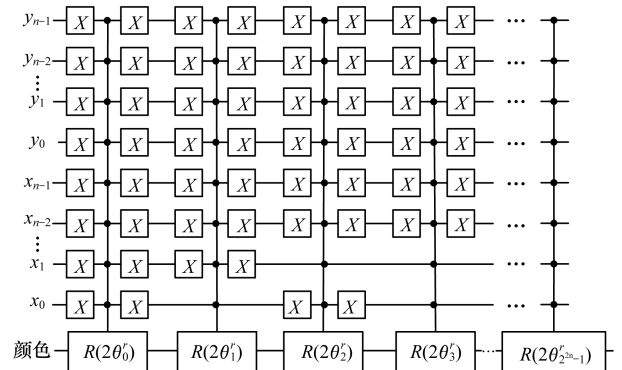


图4 嵌入量子线路

2.3 提取

在本文协议中,只有真正的产权方才能正确提取和恢复出水印图像。因为只有真正的产权方掌握置乱的密钥、嵌入水印时所需的密钥,以及初始载体图像。具体提取操作如下:

1) 根据密钥 k_i , 产权方确定水印图像嵌入的位置。

2) 当 $k_i = 0$ 时, 产权方提取水印像素值为 $\cos \varphi_i' |0\rangle + \sin \varphi_i' |1\rangle$, 其中:

$$\varphi_i' = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i'} - a_{i1}} - a_{i3} \quad (14)$$

当 $k_i = 1$ 时, 产权方提取出水印像素值为 $\cos \varphi_i' |0\rangle + \sin \varphi_i' |1\rangle$, 其中:

$$\varphi_i' = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i'} - a_{i2}} - a_{i3} \quad (15)$$

3) 产权方对含水印图像每个像素 s 点依次按如上操作, 得到水印图像:

$$\bigotimes_{i=0}^{2^{2n}-1} (\cos \varphi_i' |0\rangle + \sin \varphi_i' |1\rangle)$$

2.4 恢复

由于直接提取出的水印是经过置乱后的混乱图像, 产权方需要根据随机序列 M, N 完成对水印图像的恢复, 从而最终得到初始水印图像。以图 2 为例, 将置乱后的字母“H E F G P M N O D A B C L I J K”恢复成初始顺序“A B C D E F G H I J K L M N O P”, 相应的量子线路如图 5 所示。

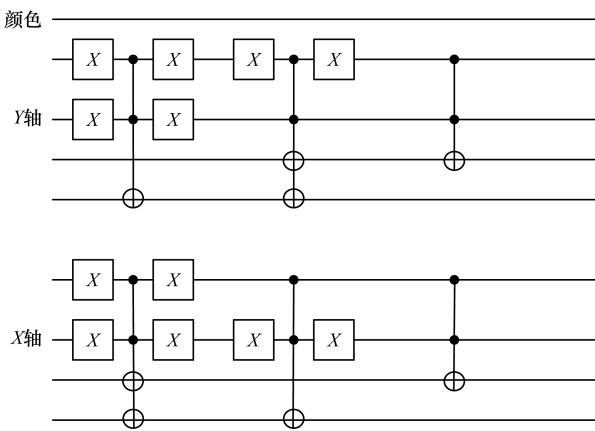


图 5 4×4 图像恢复量子线路

3 仿真与分析

目前量子计算机尚未在实际生活中被广泛应用, 因此本文在 Intel (R) Pentium (R) CPU G860 3.00 GHz RAM 2.00 GB 32 位操作系统的计算机 Matlab2012a 环境下完成仿真实验。本次仿真实验

过程按照本文协议所设计的量子线路完成, 充分验证协议的有效性。所采用的载体图像和对应秘密图像如图 6 所示, 其中, 图 6(a) ~ 图 6(d) 是载体图像, 图 6(e) ~ 图 6(h) 是水印图像。所有载体图像和水印图像大小均为 512 像素 × 512 像素的灰度图像。

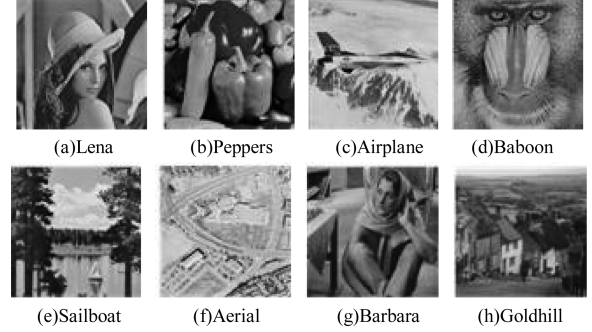


图 6 载体图像及对应的水印图像

本文提出的水印协议在载体图像中嵌入水印图像来保护载体图像的产权, 因此水印图像的安全非常重要。在经典水印中, 有 3 个性能参数用于评估水印协议, 分别是不可见性、稳健性和嵌入容量。在不同的应用环境下, 各性能参数的比重也会发生变换。因为量子图像水印还处在起步发展阶段, 一些经典数字水印中存在的攻击方式例如压缩等, 在量子图像水印上仍受到限制。因此, 在下面的性能分析中, 本文着重对不可见性、安全性和嵌入容量这 3 个方面进行分析。此外, 根据连分式算法, 本文分析了新水印协议的计算复杂度, 更好地度量协议执行的计算负载性能。

3.1 不可见性

不可见性是测量在嵌入水印过程中引起载体图像的变化。这里采用峰值信噪比 (Peak Signal to Noise Ratio, PSNR) 来比较含水印图像与初始载体图像之间的保真度。PSNR 是最为广泛的一种图像客观评价指标, 通过原图像与被处理图像之间的均方差定义。假设 2 幅大小为 $m \times n$ 的灰度图像 I 和 I' (I 为初始载体图像, I' 为含水印图像), 其 PSNR 值 p_{PSNR} 可按照下列公式求出:

$$p_{\text{PSNR}} = 20 \lg \left(\frac{255}{m_{\text{MSE}}} \right) \quad (16)$$

$$m_{\text{MSE}} = \frac{1}{mn} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} [I'(i, j) - I(i, j)]^2 \quad (17)$$

其中, m_{MSE} 是嵌入后的载体图像与原图像之间的均方差, $I'(i, j)$ 和 $I(i, j)$ 代表 (i, j) 处的像素值。将图 6 中的水印图像分别嵌入到载体图像后, 含水印图像与初始图像如图 7 所示, 相应含水印图像的峰值信噪比在表 1 中给出。



图 7 含水印图像与原载体图像对比

表 1 各含水印图像与初始载体图像的峰值信噪比 dB

载体图像	水印图像	峰值信噪比
Lena	Sailboat	60.165 9
Peppers	Aerial	59.521 7
Airplane	Barbara	58.330 6
Baboon	Goldhill	58.801 9

从图 7 的仿真实验结果可以得出,非法者无法通过肉眼发现含水印图像与原载体图像之间的差别,而嵌入的水印图像就更加难以察觉。因此,新协议的水印图像不可见性很好。值得注意的是,表 1 中针对不同的载体图像和水印图像,对应的含水印图像 PSNR 值都非常高,接近 60 dB 左右,远远超过之前的水印协议中的 PSNR 值,充分证明本文协议在不可见性方面得到了很大的提高。

3.2 安全性

一个安全的水印协议必须确保水印图像的安全。为了满足安全性方面的要求,水印协议必须保证非法者无法辨别出载体图像是否已经加密(对于不可见性水印),无法清除和篡改水印图像。在本文协议中,产权方嵌入水印图像时,借助连分式算法的性质,只对载体图像做了细微的改动,确保非法者无法感知水印图像的存在。而且在嵌入过程中所需密钥以及具体旋转操作只有产权方知晓,确保非法者无法清除或提取水印图像。因此本文协议能够满足安全性方面的要求。此外,为了进一步提高协议的安全性,在预处理阶段将水印图像置乱,即使攻击者提取出置乱后的混乱图像,也无法察觉水印的存在,有效增强抵抗攻击的能力。因此,良好的不可感知性、水印图像的置乱,以及量子力学特性为本文协议的安全性提供了强大保障。

3.3 嵌入容量

水印信息的嵌入率是量子图像水印的一个重要参数。其公式为:水印信息嵌入率 = 嵌入的水印信息最大值/载体图像大小。

本文协议嵌入的水印图像尺寸达到最大,与载体图像同等大小。并且是与载体图像同样大小的灰度图像,与之前量子水印协议^[15-17]嵌入的二值图像相比,本文协议嵌入容量有了 8 倍的增长,容量性非常好。

3.4 计算复杂度

在量子图像水印协议中,计算复杂度是衡量完成协议计算难度的性能指标。在本文协议中,除了 FRQI 量子态的制备,计算复杂度主要取决于图像置乱和嵌入。这里以 $2^n \times 2^n$ 的 FRQI 图像作为水印图像举例,协议中置乱操作所需 $4n$ 个基本量子门,嵌入算法需要 $4n$ 个 CNOT 门和 2^{2n} 个控制旋转门 $R_y(2\theta_i^r)$ 。而一个 $R_y(2\theta_i^r)$ 可分解为 $2^{2n} - 1$ 个简单操作 $R_y(\frac{2\theta_i^r}{2^{2n}-1})$ 、 $R_y(-\frac{2\theta_i^r}{2^{2n}-1})$, 和 $2^{2n} - 2$ 个 CNOT 门。在嵌入过程的连分式算法中, $\alpha_i(\beta_i) = s/r$ 是一个有理数,并且 s 和 r 是 L 比特的整数,则 α_i 或 β_i 的连分式展开可以用 $o(L^3)$ 步运算计算,其中 $o(L)$ 步分开和倒转步骤,每个步骤用 $o(L^2)$ 个基本算数门。因此本文协议所用量子基本门的数量为:

$$S = 4n + 4n + 2^{2n} \times (2^{2n} - 1 + 2^{2n} - 2) + 2^{2n} \times o(L^3) = o(2^{4n}) + (L^3 - 3) \times 2^{2n} + 8n \quad (18)$$

综上,本文协议的计算复杂度为 $o(2^{4n})$ 。在现有的量子水印协议中,文献[12]提出的协议计算复杂度最低,为 $o(n)$ 。但是该协议已经被文献[14]指出并不符合量子力学原理,且在计算复杂度时没有将酉算子分解为基本量子门,很大程度上影响了复杂度。基于目前量子水印的研究现状,本文只给出本文协议的计算复杂度,不再与其他量子水印协议相比较。

4 结束语

本文基于 FRQI 量子图像表示法,提出了一种更加安全隐蔽的量子图像水印协议。该协议借助连分式算法拥有唯一表示任何实数和无限逼近无理数的能力,在一定精度内嵌入水印,为水印图像的不可见性提供了更高的保障。在安全性方面,因为本文协议拥有更高的不可见性,并且在预处理阶段对水印图像进行置乱,非法者无法感知水印图像的存在,更好地保护了水印图像。不仅如此,本文协议中所有密钥信息和初始图像只有产权方掌握,非法者无法清除或提取水印图像,保证了水印图像的安全,同时也提供了有效的产权证明。设计出的量子线路和仿真实验有效证明了本文协议不仅具有更好的不可见性和安全性,还具有很好的可应用性。此外,本文给出新协议计算复杂度,更好地度量协议执行的计算负载性能。

考虑到量子多媒体网络中不仅有图像这种主要的传输载体,而且还有视频、音频等多种载体,在今后的研究工作中,将尝试使用更多的量子多媒体载体进行量子信息隐藏方面的工作。

参考文献

- [1] WORLEY G G. Quantum watermarking by frequency of error when observing qubits in dissimilar bases [C]// Proceedings of International Symposium on Computer Science and Its Applications. Washington D. C. , USA: IEEE Press, 2004: 41.
- [2] FATAHI N, NASERI M. Quantum watermarking using entanglement swapping [J]. International Journal of Theoretical Physics, 2012, 51(7): 2094-2100.
- [3] MO Jia, MA Zhaofeng, YANG Yixian, et al. A quantum watermarking protocol based on bell dual basis [J]. International Journal of Theoretical Physics, 2013, 52(11): 3813-3819.
- [4] ILIYASU A M, LE P Q, DONG Fangyan, et al. Watermarking and authentication of quantum images based on restricted geometric transformation [J]. Information Sciences, 2012, 186(1): 126-149.
- [5] ZHANG Weiwei, GAO Fei, LIU Bin, et al. A watermark strategy for quantum images based on quantum fourier transform [J]. Quantum Information Processing, 2013, 12(2): 793-803.
- [6] HSU C T, WU Jaling. Hidden digital watermarks in images [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1999, 8(1): 58-68.
- [7] 李 涛, 何煌兴, 瞿治国. 一种基于含水印量子图像的自适应量子隐写算法 [EB/OL]. [2017-06-24]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1196.TP.20170315.1035.058.html>.
- [8] 魏战红. 量子隐写及量子水印协议的设计与分析 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2015.
- [9] 王 宁, 林 蕊. 基于最低有效位的量子图像水印 [J]. 量子电子学报, 2015, 32(3): 263-269.
- [10] ZHANG Weiwei, GAO Fei, LIU Bin, et al. A watermark strategy for quantum images based on quantum fourier transform [J]. Quantum Information Processing, 2013, 12(2): 793-803.
- [11] YANG Yuguang, JIA Xin, XU Peng, et al. Analysis and improvement of the watermark strategy for quantum images based on quantum Fourier transform [J]. Quantum Information Processing, 2013, 12(2): 793-803.
- [12] SONG Xianhua, WANG Shen, AHMED A, et al. A dynamic watermarking scheme for quantum images using quantum wavelet transform [J]. Quantum Information Processing, 2013, 12(12): 3689-3706.
- [13] SONG Xianhua, WANG Shen, NIU Xiamu, et al. Dynamic watermarking scheme for quantum images based on Hadamard transform [J]. Multimedia Systems, 2014, 20(4): 379-388.
- [14] YANG Yuguang, XU Peng, TIAN Ju, et al. Analysis and improvement of the dynamic watermarking scheme for quantum images using quantum wavelet transform [J]. Quantum Information Processing, 2014, 13(9): 1931-1936.
- [15] SUN B, ILIYASU A, YAN F, et al. An RGB multi-channel representation for images on quantum computers [J]. Journal of Advanced Computational Intelligence & Intelligent Informatics, 2013, 17(3): 404-417.
- [16] SUN B, ILIYASU A, YAN F, et al. A multi-channel representation for images on quantum computers using the RGB α color space [C]// Proceedings of the 7th international symposium on intelligent signal processing. Washington D. C. , USA: IEEE Press, 2011: 1-6.
- [17] YAN Fei, ILIYASU A M, SUN Bo, et al. A duple watermarking strategy for multi-channel quantum images [J]. Quantum Information Processing, 2015, 14(5): 1675-1692.
- [18] QUANG P L, DONG F, ARAI Y, 等. 量子图像的柔性表示及其计算复杂性分析 [C]// 韩国智能系统学会国际学术大会发表论文集. 釜山, 韩国: [出版者不详], 2009: 146-149.
- [11] JIANG X L, WANG Q, HE B, et al. Robust level set image segmentation algorithm using local correntropy-based fuzzyc- means clustering with spatial constraints [J]. Neurocomputing, 2016, 207(C): 22-35.
- [12] 廖祥云, 袁志勇, 郑 奇, 等. 引入局部全局信息的区域自适应局域化快速活动轮廓模型 [J]. 计算机学报, 2016, 39(7): 1464-1476.
- [13] LI C, XU C, GUI C, et al. Level set evolution without re-initialization: a new variational formulation [C]// Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Washington D. C. , USA: IEEE Press, 2005: 430-436.
- [14] LIAO X, YUAN Z, ZHENG Q, et al. Multi-scale and shape constrained localized region-based active contour segmentation of uterine fibroid ultrasound images in HIFU therapy [J]. PLOS One, 2014, 9(7).
- [15] DIETENBECK T, ALESSANDRINI M, FRIBOULET D, et al. Creaseg: a free software for the evaluation of image segmentation algorithms based on level-set [C]// Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing. Washington D. C. , USA: IEEE Press, 2010: 665-668.
- [16] BRATRA D, KOWDLE A, PARIKH D, et al. iCoseg: interactive cosegmentation by touch [EB/OL]. [2017-09-25]. <http://chenlab.ece.cornell.edu/projects/touch-coseg/index.html>.

编辑 顾逸斐

编辑 吴云芳

(上接第233页)