

量子隐形传态前沿阅读报告

姓名： 学号

所在学院：信息与电子工程学院, 浙江大学

Email: 3210101017@zju.edu.cn

摘要：量子隐形传态（QT）利用量子力学原理，能够实现远距离通信并保证不被窃听。本文对 QT 原理进行简要介绍，并结合前沿文献，介绍了如何提升 QT 的传输速率，QT 如何用于图像传输，区块链技术如何应用到 QT 过程以进一步提升安全性和稳定性。

一. 背景介绍

近年来，量子技术逐渐成为电子信息领域的研究热点之一。利用量子力学的特性，可以在传统电子、通信领域取得新的突破。量子隐形传态（QT）是一种基于量子力学原理的通信方式，它利用量子纠缠现象，实现了在不发送任何量子位的情况下，将量子位的未知态传输到任意距离的位置。选择合适的通信协议，可以实现双向、多量子比特传输以提高通信效率，通过与区块链等技术的结合，可以增强通信过程中的安全性。

二. 原理

在量子计算和量子通信中，信息的基本单元是量子位，一个可以同时存在于 $|0\rangle$ 和 $|1\rangle$ 的叠加态的量子系统。量子位的状态 $|\Psi\rangle$ 使用复数 α 和 β 表示如下：

$$|\Psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle = \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1 \quad (2)$$

复系数模值的平方表示测量得到该状态的几率。

现考虑量子隐形传态模型，如图 1 中的量子信道所示。图中有两个通信方 Alice（A）和 B（Bob），最初都处于状态 $|0\rangle$ 。Alice 拥有一个量子叠加态 $|\Psi\rangle$ ，它希望将其传输到 Bob。三个量子比特的初始状态可表示为：

$$|\text{state } 0\rangle = |\Psi\rangle \otimes |0\rangle \otimes |0\rangle \quad (3)$$

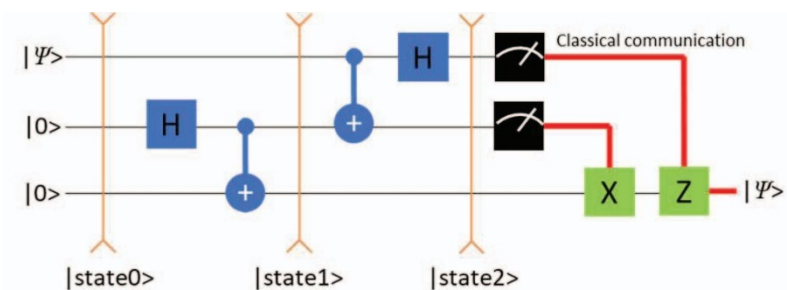


图 1 量子隐形传态的量子信道

为了传输 $|\Psi\rangle$ ，先将 Alice 的初态通过 H 门，门的输出作用于一个 $CNOT$ 门的控制位。此时整体的量子态 $|\text{state 1}\rangle$ 可表示为：

$$\begin{aligned}
 |\text{state 1}\rangle &= CNOT_{2,3}H_2|\text{state 0}\rangle \\
 &= CNOT_{2,3}H_2|\Psi\rangle \otimes |0\rangle \otimes |0\rangle \\
 &= CNOT_{2,3}|\Psi\rangle \otimes H|0\rangle \otimes |0\rangle \\
 &= CNOT_{2,3}\left(|\Psi\rangle \otimes \frac{|0\rangle + |1\rangle}{\sqrt{2}} \otimes |0\rangle\right) \\
 &= CNOT_{2,3}\left(|\Psi\rangle \otimes \frac{|00\rangle + |10\rangle}{\sqrt{2}}\right) \\
 &= |\Psi\rangle \otimes \left(\frac{|00\rangle + |10\rangle}{\sqrt{2}}\right) \\
 &= \frac{\alpha(|000\rangle + |011\rangle) + \beta(|100\rangle + |111\rangle)}{\sqrt{2}}
 \end{aligned} \tag{4}$$

将 $CNOT$ 门作用于第一和第二量子位，并将 H 门作用于第一量子位得到量子态 $|\text{state 2}\rangle$ ，可以表示为：

$$\begin{aligned}
 |\text{state 2}\rangle &= H_1CNOT_{1,2}|\text{state 1}\rangle \\
 &= \frac{H_1(\alpha(|000\rangle + |011\rangle) + \beta(|110\rangle + |101\rangle))}{\sqrt{2}} \\
 &= \alpha\left(\frac{|000\rangle + |100\rangle}{2} + \frac{|011\rangle + |111\rangle}{2}\right) + \beta\left(\frac{|010\rangle - |110\rangle}{2} + \frac{|001\rangle + |101\rangle}{2}\right) \\
 &= \frac{1}{2}|00\rangle(\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle) + \frac{1}{2}|01\rangle(\alpha|1\rangle + \beta|0\rangle) \\
 &\quad + \frac{1}{2}|10\rangle(\alpha|0\rangle - \beta|1\rangle) + \frac{1}{2}|11\rangle(\alpha|1\rangle - \beta|0\rangle)
 \end{aligned} \tag{5}$$

在 $|\text{state 2}\rangle$ 中，可以发现：如果 Alice 测量前两个量子位，则有四种可能的结果： $|00\rangle$ 、 $|01\rangle$ 、 $|10\rangle$ 和 $|11\rangle$ ，每个结果的概率相等，为 0.25，即 $\frac{1}{2}$ 的平方。在 A 进行这样的测量时，根据量子纠缠的性质，Bob 的量子位也将坍塌为四种可能的叠加态之一。因此，Bob 从 Alice 接收前两个量子位的测量结果，并执行相应的量子门操作，如表 1 所示，以在所有测量结果中再现原始量子态 $|\Psi\rangle$ ，从而完成量子隐形传态。

表 1 Bob 在接收 Alice 的测量结果后按情况分别进行的量子门操作

B 's qubit state	Received	Gate	Final State
$\alpha 0\rangle + \beta 1\rangle$	00	I	$\alpha 0\rangle + \beta 1\rangle$
$\alpha 1\rangle + \beta 0\rangle$	01	X	$\alpha 0\rangle + \beta 1\rangle$
$\alpha 0\rangle - \beta 1\rangle$	10	Z	$\alpha 0\rangle + \beta 1\rangle$
$\alpha 1\rangle - \beta 0\rangle$	11	ZX	$\alpha 0\rangle + \beta 1\rangle$

Alice 对她的量子比特对 (B, C) 进行 *CNOT* 门操作，其中 B 作为控制位，C 作为目标位。

Bob 对他的两个量子比特对进行 *CNOT* 门操作：首先将量子比特 3 作为控制位，4 作为目标位，然后量子比特 5 作为控制位，4 作为目标位。

步骤 1 结束后，系统的状态为：

$$|\phi'\rangle = 0.5[(a_0|000\rangle_{AB1}|000\rangle_{234} + a_0|001\rangle_{AB1}|111\rangle_{234} + a_1|110\rangle_{AB1}|000\rangle_{234} + a_1|111\rangle_{AB1}|111\rangle_{234}) \otimes |0\rangle_C \otimes (b_0|00\rangle_{D5}|0\rangle_6 + b_0|01\rangle_{D5}|1\rangle_6 + b_1|10\rangle_{D5}|0\rangle_6 + b_1|11\rangle_{D5}|1\rangle_6)] \quad (12)$$

该状态还可以表示为：

$$(|\phi'\rangle = 0.25\{[|G_1\rangle_{AB1}(a_0|000\rangle + a_1|111\rangle)_{234} + |G_2\rangle_{AB1}(a_0|000\rangle - a_1|111\rangle)_{234} + |G_3\rangle_{AB1}(a_0|111\rangle + a_1|000\rangle)_{234} + |G_4\rangle_{AB1}(a_0|111\rangle - a_1|000\rangle)_{234}\} \otimes |0\rangle_C \otimes \{|\phi^+\rangle_{D5}(b_0|0\rangle + b_1|1\rangle)_6 + \{|\phi^-\rangle_{D5}(b_0|0\rangle - b_1|1\rangle)_6 + |\psi^+\rangle_{D5}(b_0|1\rangle + b_1|0\rangle)_6 + |\psi^-\rangle_{D5}(b_0|1\rangle - b_1|0\rangle)_6\}) \quad (13)$$

其中 $|\phi^\pm\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle \pm |11\rangle)$, $|\psi^\pm\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|01\rangle \pm |10\rangle)$ 是贝尔态, $|G_i\rangle, i = 1, 2, 3, 4$ 是 GHZ 态:

$$|G_1\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|000\rangle + |111\rangle), |G_2\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|000\rangle - |111\rangle) \quad (14.a)$$

$$|G_3\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|001\rangle + |110\rangle), |G_4\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|001\rangle - |110\rangle) \quad (14.b)$$

步骤 2: 测量和经典通信。

表 2 量子位 2、3、4、6 的坍塌态、Bob (Alice) 测量结果 MR 对应的 Alice (Bob) 进行的量子门操作 UO

Alice's MR	Bob's MR	Collapsed state of qubits 2, 3, 4 & 6	Alice's UO U_6	Bob's UO $U_2 \otimes U_3 \otimes U_4$
$ G_1\rangle_{AB1}$	$ \phi^+\rangle_{D5}$	$(a_0 000\rangle + a_1 111\rangle)_{234} \otimes (b_0 0\rangle + b_1 1\rangle)_6$	I	$I \otimes I \otimes I$
$ G_1\rangle_{AB1}$	$ \phi^-\rangle_{D5}$	$(a_0 000\rangle + a_1 111\rangle)_{234} \otimes (b_0 0\rangle - b_1 1\rangle)_6$	σ_z	$I \otimes I \otimes I$
$ G_1\rangle_{AB1}$	$ \psi^+\rangle_{D5}$	$(a_0 000\rangle + a_1 111\rangle)_{234} \otimes (b_0 1\rangle + b_1 0\rangle)_6$	σ_x	$I \otimes I \otimes I$
$ G_1\rangle_{AB1}$	$ \psi^-\rangle_{D5}$	$(a_0 000\rangle + a_1 111\rangle)_{234} \otimes (b_0 1\rangle - b_1 0\rangle)_6$	$\sigma_z \sigma_x$	$I \otimes I \otimes I$
$ G_2\rangle_{AB1}$	$ \phi^+\rangle_{D5}$	$(a_0 000\rangle - a_1 111\rangle)_{234} \otimes (b_0 0\rangle + b_1 1\rangle)_6$	I	$\sigma_z \otimes \sigma_z \otimes \sigma_z$
$ G_2\rangle_{AB1}$	$ \phi^-\rangle_{D5}$	$(a_0 000\rangle - a_1 111\rangle)_{234} \otimes (b_0 0\rangle - b_1 1\rangle)_6$	σ_z	$\sigma_z \otimes \sigma_z \otimes \sigma_z$
$ G_2\rangle_{AB1}$	$ \psi^+\rangle_{D5}$	$(a_0 000\rangle - a_1 111\rangle)_{234} \otimes (b_0 1\rangle + b_1 0\rangle)_6$	σ_x	$\sigma_z \otimes \sigma_z \otimes \sigma_z$
$ G_2\rangle_{AB1}$	$ \psi^-\rangle_{D5}$	$(a_0 000\rangle - a_1 111\rangle)_{234} \otimes (b_0 1\rangle - b_1 0\rangle)_6$	$\sigma_z \sigma_x$	$\sigma_z \otimes \sigma_z \otimes \sigma_z$
$ G_3\rangle_{AB1}$	$ \phi^+\rangle_{D5}$	$(a_0 111\rangle + a_1 000\rangle)_{234} \otimes (b_0 0\rangle + b_1 1\rangle)_6$	I	$\sigma_x \otimes \sigma_x \otimes \sigma_x$
$ G_3\rangle_{AB1}$	$ \phi^-\rangle_{D5}$	$(a_0 111\rangle + a_1 000\rangle)_{234} \otimes (b_0 0\rangle - b_1 1\rangle)_6$	σ_z	$\sigma_x \otimes \sigma_x \otimes \sigma_x$
$ G_3\rangle_{AB1}$	$ \psi^+\rangle_{D5}$	$(a_0 111\rangle + a_1 000\rangle)_{234} \otimes (b_0 1\rangle + b_1 0\rangle)_6$	σ_x	$\sigma_x \otimes \sigma_x \otimes \sigma_x$
$ G_3\rangle_{AB1}$	$ \psi^-\rangle_{D5}$	$(a_0 111\rangle + a_1 000\rangle)_{234} \otimes (b_0 1\rangle - b_1 0\rangle)_6$	$\sigma_z \sigma_x$	$\sigma_x \otimes \sigma_x \otimes \sigma_x$
$ G_4\rangle_{AB1}$	$ \phi^+\rangle_{D5}$	$(a_0 111\rangle - a_1 000\rangle)_{234} \otimes (b_0 0\rangle + b_1 1\rangle)_6$	I	$i\sigma_y \otimes i\sigma_y \otimes i\sigma_y$
$ G_4\rangle_{AB1}$	$ \phi^-\rangle_{D5}$	$(a_0 111\rangle - a_1 000\rangle)_{234} \otimes (b_0 0\rangle - b_1 1\rangle)_6$	σ_z	$i\sigma_y \otimes i\sigma_y \otimes i\sigma_y$
$ G_4\rangle_{AB1}$	$ \psi^+\rangle_{D5}$	$(a_0 111\rangle - a_1 000\rangle)_{234} \otimes (b_0 1\rangle + b_1 0\rangle)_6$	σ_x	$i\sigma_y \otimes i\sigma_y \otimes i\sigma_y$
$ G_4\rangle_{AB1}$	$ \psi^-\rangle_{D5}$	$(a_0 111\rangle - a_1 000\rangle)_{234} \otimes (b_0 1\rangle - b_1 0\rangle)_6$	$\sigma_z \sigma_x$	$i\sigma_y \otimes i\sigma_y \otimes i\sigma_y$

Alice 通过使用状态 $|G_i\rangle$ 对她的量子比特（A，B，1）进行冯诺依曼型测量，Bob 通过使用贝尔基 $\{|\phi^\pm\rangle, |\psi^\pm\rangle\}$ 对他的量子比特对（D，5）进行贝尔态测量。Alice 和 Bob 通过经典通信将他们的测量结果传达给彼此。表 2 中给出了与 Alice 和 Bob 的测量结果相对应的量子比特 2、3、4 和 6 的坍缩态

步骤3：量子门操作。

Alice 根据从 Bob 接收到的测量结果对她的量子比特 6 进行适当的量子门操作。Bob 根据从 Alice 接收到的测量结果对他的量子比特 2、3、4 进行适当的量子门操作。

经过以上三个步骤后，Alice 和 Bob 都接收到了对方的信息。相比于单向单比特量子隐形传态，这种方式的效率明显更高。

（二）量子图像隐形传态协议（QITP）

利用量子隐形传态，可以进行文字、声音、图像的传递。下面以图像为例，分析介绍量子图像隐形传态协议。

标准 QITP 使用图 3 中所示的量子隐形传态技术将图像的量子态从发送端 Alice 传送到接收端 Bob。该协议可以传送图像像素的每个 RGB 值的量子态。该协议可以使用多达三个量子比特来执行，其中两个用于 Alice、Bob，剩余一个为中间量子比特（Telamon）。使用标准 QITP 传送数字图像的量子态的步骤如下：

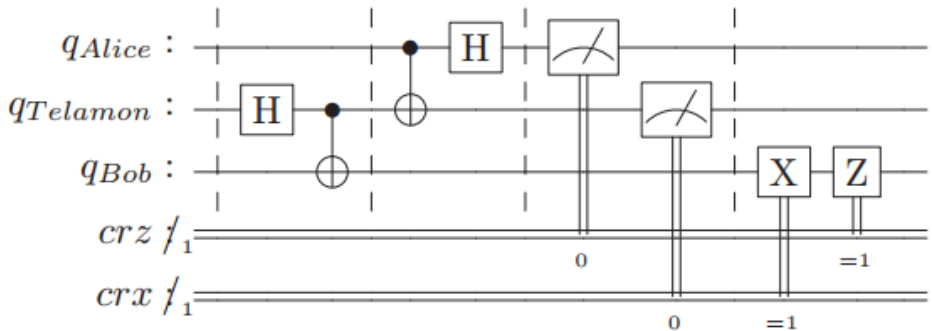


图 3 利用量子隐形传态实现量子图像传送

步骤一：读取图像，将图像转换为相应的 RGB 格式，然后从像素中提取 RGB 值。

步骤二：将每个 RGB 值转换为 8 位二进制格式。

步骤三：分别读取每一个 8 位二进制数，根据 Alice、Bob 和 Telamon 可用的量子比特数量将其划分为子二进制串，并将每个二进制值的量子态传输到图 3 中的量子隐形传态网络。

步骤四：接收方 Bob 可以在二进制串成功传送后获得其量子态，然后将其转换回图像中每个像素的 RGB 值，并以图像格式保存。

还可以使用 QITP 和霍夫曼编码改进上述过程。这需要至少三个量子比特传送二进制数据的量子态，每个二进制串被压缩后生成二进制子串在信道中同时通信。由于霍夫曼编码主要应用于文本文件，因此首先需要将图像文件

的像素及其等效的 RGB 值转换为文本文件。为了避免在像素的预处理和后处理过程中出现歧义，还执行了附加 ASCII 字符的操作，起到校验作用。

由于具有霍夫曼编码的 QITP 使用了更多的字符，数据传输比标准 QITP 需要更长的时间，而作为回报，其最大的收益是提高了安全性。

(三) 量子隐形传态与区块链技术

在量子隐形传态过程中，窃听者 Eve 虽然不能复制信道中的量子信息，但是可以拦截量子信息并向 Bob 提供伪造的量子比特来干扰通讯过程。此外，在通讯过程中，经典比特需要穿过大量的网络节点，如中继器、集线器、交换机和路由器，这种错综复杂的路线加剧了系统的复杂性。

因此，传统量子隐形传态系统仍具有安全隐患，我们需要高度可靠、高效和安全的技术来实现更安全和稳定的量子隐形传态协议，区块链就是其中一种解决方案。

Alice 在将测量过程中生成的所有数据发送到 Bob 之前，将其记录到块中。这些块按时间顺序连接在一起，形成一个不可变的链，使 Bob 能够跟踪或检索任何所需的记录。具体而言，在完成两个量子位的测量后，Alice 使用区块链向 Bob 传输数据，过程如下所示。

步骤 1: Alice 通过请求来自 Bob 的数据传输以启动通信过程。

步骤 2: 生成包含相关信息的块。该块封装了有关测量的细节，包括有关量子比特状态的数据和任何其他相关元数据。然后对封装的信息进行哈希值散列化，并将该散列存储在块中以确保数据的完整性。

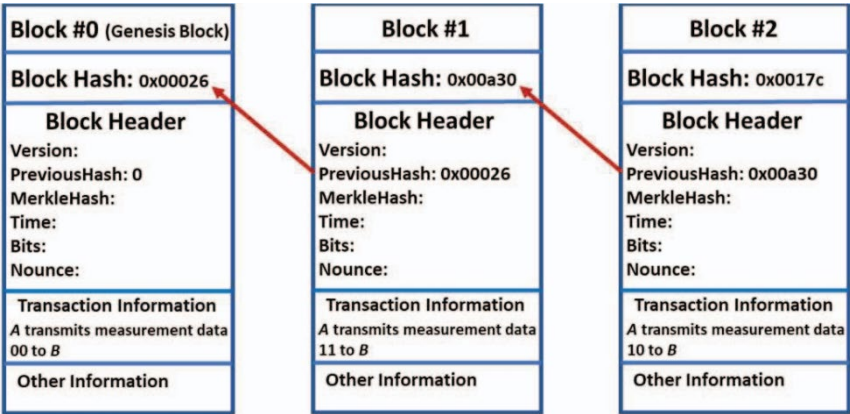


图 4 区块链用于量子隐形传态

步骤 3: 区块一旦准备好，将不仅仅发送给 Bob，而是被发送到网络中的所有节点，确保了事务的透明度和可靠性。该过程遵循区块链固有的去中心化架构，增加了额外的安全性和稳定性。

步骤 4: 网络中的任何参与者在收到区块后，相互验证其中包含的信息的有效性。这种共识协议确保只有经过验证和有效的区块才能添加到链中，以防止伪造信息并确保数据的完整性。

步骤 5: 一旦一个块被验证，它就会被链接到前一个块，从而创建一个块链。链接是通过将前一个块的哈希包含在当前块中来创建的，以便于追踪。然后，更新后的区块链副本以去中心化的方式分发，在网络上保持区块链的最新和同步状态。

步骤 6: 随着已验证区块的链接和区块链的更新, Alice 通过将测量数据传输给 Bob 来完成隐形传送过程。这确保了 Bob 能安全地接收量子信息, 并从区块链中接收的区块中验证量子信息。

步骤 7: 如有必要, Bob 可以通过访问区块链网络进一步验证传输数据的有效性。这使 Bob 能够将接收到的数据与区块链中记录的数据进行交叉验证, 确保没有篡改或错误信息。在区块链中修改信息实际上是不可能的, 因为这需要修改大多数区块链参与者持有的数据。

区块链中使用的加密技术, 包括哈希函数、数字签名和公钥加密算法, 提供了强大的安全性。哈希函数将任意数据转换为特定长度的哈希值, 通过将原始数据的哈希值与传输的数据进行比较, 可以容易地检测到任何差异或篡改。

四. 总结与展望

本文对量子隐形传态进行了简要介绍, 并结合前沿文献分析说明了量子隐形传态的发展方向和应用方式。随着量子技术的发展, 量子隐形传态具有的远距离性、安全性等优势将逐步明显, 势必将在新一代的电子信息技术中被广泛使用。

参考文献:

- [1] J. Butts, E. White and J. Baek, "A Quantum Teleportation Protocol Secured by a Blockchain Technology," 2023 Congress in Computer Science, Computer Engineering, & Applied Computing (CSCE), Las Vegas, NV, USA, 2023, pp. 1665-1669, doi: 10.1109/CSCE60160.2023.00273.
- [2] V. Verma, "Bidirectional Quantum Teleportation by Using Two GHZ-States as the Quantum Channel," in IEEE Communications Letters, vol. 25, no. 3, pp. 936-939, March 2021, doi: 10.1109/LCOMM.2020.3036587.
- [3] R.-G. Zhou, R. Xu, and H. Lan, "Bidirectional quantum teleportation by using six-Qubit cluster state," IEEE Access, vol. 7, pp. 44269-44275, 2019.
- [4] S. Hassanpour and M. Houshmand, "Bidirectional teleportation of a pure EPR state by using GHZ states," Quantum Inf. Process., vol. 15, no. 2, pp. 905-912, Feb. 2016.
- [5] M. Karthik, J. Lalwani and B. Jajodia, "Quantum Image Teleportation Protocol (QITP) and Quantum Audio Teleportation Protocol (QATP) by using Quantum Teleportation and Huffman Coding," 2022 International Conference on Trends in Quantum Computing and Emerging Business Technologies (TQCEBT), Pune, India, 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/TQCEBT54229.2022.10041599.