

# 基于量子通信的密集编码技术

(电子与信息工程学院 20 级通信工程)

**摘要：**本文介绍了基于量子通信的密集编码技术及其关键原理。密集编码技术是一种利用量子通信实现多比特信息传输的通信协议。通过制备纠缠态和对粒子进行操作和测量，可以在通信双方共享的纠缠粒子对中传输多个比特的信息。文章还介绍了量子态叠加和量子态鉴别的概念，并详细阐述了基于 GHZ 态的密集编码方案的实现过程。此外，文中还提到了量子光源的重要性，它能产生特定的量子态，用于信息的编码和传输。量子编码器和解码器的作用是将信息编码到量子态上和解码出原始信息。最后，文章讨论了基于量子通信的密集编码技术在光纤通信网络和量子计算中的应用场景。

。

**关键词：**量子通信；密集编码；量子态叠加；量子态鉴别；光纤通信；

## Dense Coding Technology based on Quantum Communication

Class of 2020, Communication Engineering, College of Electronic and Information Engineering.

**Abstract:** This article introduces the dense coding technique based on quantum communication and its key principles. Dense coding is a communication protocol that utilizes quantum communication for the transmission of multi-bit information. By preparing entangled states and manipulating and measuring particles, it is possible to transmit information of multiple bits in entangled particle pairs shared between the communicating parties. The article also presents the concepts of quantum superposition and quantum state discrimination, and elaborates on the implementation process of dense coding schemes based on GHZ states. Additionally, the importance of quantum light sources is mentioned, as they generate specific quantum states used for information encoding and transmission. Quantum encoders and decoders play a role in encoding information onto quantum states and decoding the original information. Finally, the article discusses the application scenarios of dense coding based on quantum communication in optical fiber communication networks and quantum computing.

### 1. 基于量子通信的超密集编码技术基本原理

子密集编码是一种通信协议，由 Bennett 在 1992 年提出<sup>[1]</sup>。该协议的基本原理如下：



图 1 量子密集编码过程示意图

假设有两个合法通信方，分别为 Alice 和 Bob。首先，Alice 制备一个 EPR 纠缠态，如果该态处于 $|\Phi^+\rangle_{AB}$ 态：

$$|\Phi^+\rangle_{AB} = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |11\rangle) \quad (1-1)$$

然后，Alice 保留 A 粒子，将 B 粒子发送给 Bob。这样，通信双方就共享了一对纠缠粒子对，即通信信道的建立过程。Bob 收到 B 粒子后，可以选择以下四种操作之一来操作粒子 B：

$$I = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \sigma_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\sigma_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}, \sigma_3 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}, \quad (1-1)$$

在量子密集编码中，Bob 对粒子 B 进行操作后，A 和 B 两个粒子的纠缠态会发生改变为：

$$\begin{aligned} I|\Phi^+\rangle &= |\Phi^+\rangle \\ \sigma_1|\Phi^+\rangle &= |\Psi^+\rangle \\ \sigma_2|\Phi^+\rangle &= |\Phi^-\rangle \\ \sigma_3|\Phi^+\rangle &= |\Psi^-\rangle \end{aligned} \quad (1-2)$$

然后 Bob 将粒子 B 传递给 Alice，Alice 对手中的两个粒子进行联合测量，从而能够确定 Bob 所进行的操作。如果双方事先约定了四种情况分别表示 00、01、10、11，那么就成功地传输了 2 比特的信息。这个过程就是量子密集编码。

## 1.1 量子态叠加

密集编码技术利用量子态叠加的原理来实现多比特信息的传输。在量子通信中，量子态叠加允许在一个量子比特上同时携带多个信息比特的信息。通过将不同的信息编码到不同的量子叠加态上，可以在传输时间间隔内传输更多的信息。

## 1.2 量子态鉴别

密集编码技术中的量子态鉴别是指接收端对传输过来的量子态进行准确的识别和解码。通过量子测量和量子态重构技术，可以将传输的量子态转化为可处理的信息比特。

## 2. 基于量子通信的密集编码技术实现过程

Dense coding 方案的具体实现，Dense coding 是一种量子通信方案，方案实验原理如图 2；在这个方案中，Alice 和 Bob 共享一对纠缠态粒子（GHZ 态）。在实验中，Alice 执行了左边虚线框内的操作，该操作由两个部分组成。首先，Alice 使用她所拥有的粒子来编码信息，并通过部分 II 完成纠缠态 GHZ 的制备。然后，在右边虚线框内，Bob

执行操作 1, 2 和 3, 这些操作步骤使得 Bob 能够成功地解码出 Alice 编码在她所拥有的粒子中的信息。

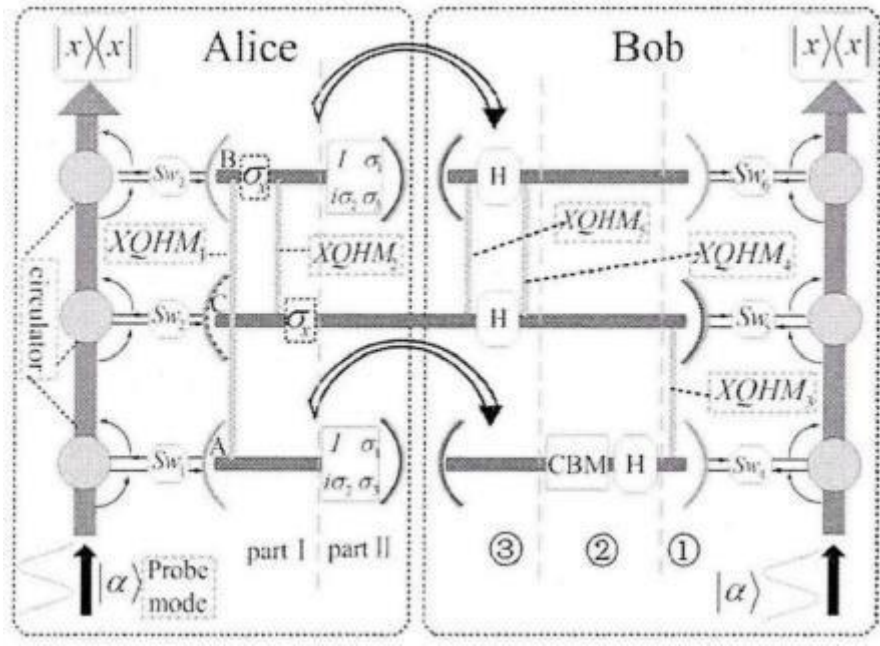


图 2 基于 GHZ 态的 dense coding 实验实现原理图。

其中, H 代表 Hadamard gate 操作, CBM 代表原子态基底测量,  $|x\rangle|x\rangle$  代表了 XOHM 操作, XQHM, ( $i=0, 1, 2, 3$ ) 是代表第  $i$  个 XQHM 操作, Sw 指的是第  $i$  个光学控制开关。为了实现 dense coding, Alice 同时对粒子 A 和 B 进行  $I, \sigma_x, i\sigma_y$ , 和  $\sigma_z$  四种操作中的一种, 如图 2 中部分 II。这些被施加在原子 A 和 B 上的操作把系统的初态  $|\Psi\rangle_0$  演化为如下四种形式

$$\begin{aligned} |\Psi\rangle_{1,4} &= \frac{1}{\sqrt{2}} (|100\rangle_{ABC} \pm |111\rangle_{ABC}) \\ |\Psi\rangle_{2,3} &= \frac{1}{\sqrt{2}} (|101\rangle_{ABC} \pm |010\rangle_{ABC}) \\ |\Psi\rangle_{5,8} &= \frac{1}{\sqrt{2}} (|100\rangle_{ABC} \pm |011\rangle_{ABC}) \\ |\Psi\rangle_{6,7} &= \frac{1}{\sqrt{2}} (|001\rangle_{ABC} \pm |110\rangle_{ABC}) \end{aligned} \quad (1-2)$$

综合考虑这些因素方案实验上的成功可能性大约为<sup>[5]</sup>

$$P = (1 - 2\%)^3 (1 - 6\%) (1 - 2.3 \times 10^{-4})^5 \approx 0.8837.$$

这个方案有两个关键点。首先, 在 Bob 解码信息时, 他执行的操作是循环性的, 这符合计算机的特点, 因为简单的循环操作对计算机而言最有效率。其次, 除了这两点, 这个方案还有其他优势。在总的信息量不变的情况下, 这个方案可以有效减少节点数, 从而增强计算机工作的稳定性。特别地, 该方案解决了 WNCK 只能产生小角度缺陷的问题。

## 2.1 量子光源

量子光源是基于量子效应的光源<sup>[6]</sup>，能够产生特定的量子态，如单光子态或纠缠光子对态。在密集编码技术中，量子光源起着关键的作用，它能够将信息编码到这些量子态上，实现多比特信息的传输和处理。

单光子源是一种能够发射单个光子的光源。它利用非线性光学效应或量子点等材料的特性来产生单光子态。单光子源能够在确定的时间间隔内发射出一个光子，这个光子可以携带一个比特的信息。通过控制发射的时间和光子的极化态等参数，可以实现对信息的编码。纠缠光子对源是一种能够产生纠缠态的光源。纠缠态是一种特殊的量子态，其中两个光子之间存在强烈的相互关联，无论它们之间的距离有多远。纠缠光子对源能够产生一对纠缠的光子，其中一个光子的状态的变化会立即影响到另一个光子的状态。这种纠缠关系可以用于实现量子通信中的信息传输和量子计算中的量子门操作等。

量子光源的稳定性和效率是密集编码技术中的重要考虑因素。为了实现高效的密集编码，量子光源需要能够稳定地产生特定的量子态，并具有高的发射效率。同时，还需要控制光源的非线性效应和噪声，以减少信息传输过程中的误差和损耗。

近年来，研究人员在量子光源领域取得了显著的进展，开发出了多种高效稳定的量子光源。这些光源的发展为密集编码技术的应用提供了坚实的基础。随着量子技术的不断发展和进步，量子光源的性能和可靠性将进一步提升，为密集编码技术的实际应用带来更多机遇和挑战。

## 2.2 量子编码器和量子解码器

量子编码器和量子解码器负责将传输的信息编码到量子态上和解码出原始信息。量子编码器将信息比特映射到量子态上，而量子解码器则执行相反的操作。

量子网络与经典自编码器模型类似，都是由一组相互连接的节点组成的图形表示。在量子网络中，每个节点表示一个量子比特，第一层是输入寄存器，最后一层是输出寄存器。图中的边表示连接相邻层的酉变换，即将输入从第一层传递到下一层。自编码器的作用是将第一层和第二层之间的空间缩小如图 3a)。

对于包含自动编码网络的量子电路而言，首先使用一个叫做“编码器”的部分对输入节点进行处理。然而，在这个过程中，一些输入节点中的信息必须被丢弃。我们可以想象通过追踪代表这些节点的量子比特来实现这一点（在图 3b）中，通过对这些量子比特进行测量来表示）。然后，我们准备新的量子比特，将其初始化为某个参考状态，并使用它们来实现最终的“解码器”部分，以重构输入的初始状态。然后，将重构的结果与初始状态进行比较。

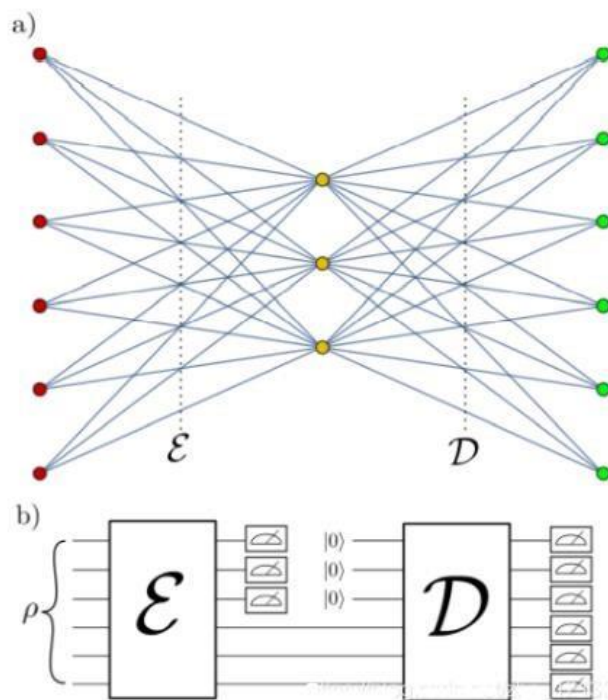


图 3 具有 3 位潜在空

间的 6 位自动编码器的图形表示。

3. 基于量子通信的密集编码技术在多个领域具有潜在的应用场景<sup>[6]</sup>。以下是其中两个典型的应用场景：

3.1 **光纤通信网络**：密集编码技术可以在光纤通信网络中提高信息传输的速率和容量。传统的光纤通信系统中，每个光子只能携带一个比特的信息。但通过应用密集编码技术，可以将多个比特的信息编码到单个光子态中，并在传输时间间隔内传输更多的信息。这样可以提高信息传输的效率，减少通信的时间延迟，并支持更大规模的数据传输和 2 高速率的通信。密集编码技术在光纤通信网络中的应用有助于满足日益增长的数据需求和提高网络性能。

3.2 **量子计算**：密集编码技术也可以应用于量子计算中，提高量子比特的利用率。量子计算利用量子力学原理进行信息处理，其基本单位是量子比特（qubit）。传统的量子计算中，每个量子比特只能携带一个比特的信息。但通过密集编码技术，可以在一个量子比特上同时携带多个比特的信息。这样可以加快量子计算的速度，提高计算效率。密集编码技术在量子计算中的应用有助于充分利用量子资源，提高计算能力和解决复杂问题的能力，目前，量子计算<sup>[8]</sup>领域已形成超导、离子阱、量子光学等多条技术路线，集结了 D-Wave 、谷歌、IBM、英特尔、英伟达、霍尼韦尔、中科院、中科大、本源量子等一批国内外企业、科研团队，推动技术快速演进升级，已经形成“你方唱罢，我登场”的火热竞争格局。。

这些典型应用场景只是密集编码技术在量子通信领域中的一部分，实际上，该技术还具有广泛的应用潜力。例如，在量子密码学、量子传感和量子网络等领域也可以应用密集编码技术来提高信息传输的安全性、灵敏度和可靠性。随着量子技术的进一步发展和应用的拓展，密集编码技术将在更多领域展现其价值，并对未来的通信和计算方式产生深远的影响。

#### 4. 结论

基于量子通信的密集编码技术具有提高信息传输效率和容量的潜力。该技术利用量子态的特性，在每个传输时间间隔内携带多个比特的信息。通过量子态叠加和量子态鉴别等关键概念，密集编码技术可以实现多比特信息的传输和处理。在实现过程中，量子光源起着关键作

用，能够产生特定的量子态。同时，量子编码器和量子解码器负责将信息编码到量子态上和解码出原始信息。基于量子通信的密集编码技术在光纤通信网络和量子计算领域具有典型应用案例。在光纤通信网络中，该技术可以提高信息传输速率和容量，减少通信延迟，支持大规模数据传输和高速率通信。而在量子计算中，该技术可以提高量子比特的利用率。随着量子技术的发展，密集编码技术有望在实际应用中发挥更大的优势，并推动量子通信和量子计算领域的进一步发展。

#### 参考文献

- [1] Bennett C H, Wiesner S. Communication via One- and Two-Particle Operators on Einstein-Podolsky-Rosen States[J]. Physical Review Letters, 1992, 69(20): 2881-2884.
- [2] 唐敖庆, 徐元植, 唐敖庆之量子力学[M]. 浙江大学出版社, 2011.
- [3] [https://blog.csdn.net/weixin\\_42017454/article/details/123937426](https://blog.csdn.net/weixin_42017454/article/details/123937426)
- [4] 张雨欣. 量子密集编码的安全性分析 [D]. 北京邮电大学, 2020. DOI:10.26969/d.cnki.gbydu.2020.002926.
- [5] [1]孙倩. 基于光学系统的量子逻辑门和量子密集编码[D]. 安徽大学, 2015.
- [6] The interference effects at the Bell-state analyzer showed a high sensitivity on the size and position of the irises. The reason might be that the irises still are within the Rayleigh length of the source. Fresnel diffraction has therefore to be considered R. Chiao (private communication).
- [7] Su S L, Guo Q, Zhu L, Wang H F and Zhang S. Atomic quantum information processing in low-Q cavity in the intermediate coupling region [J. J. Opt. Soc. Am. B 2012, 29: 002827.
- [8] [量子计算密集“上新”，最新成果哪家强？ 腾讯新闻 \(qq.com\)](#)