

光纤量子通信中的抗信道噪声分析*

范元冠杰 谢蔚鑫 王双[†] 韩正甫

(中国科学技术大学物理学院 中国科学院量子信息重点实验室 合肥 230026)

2025-03-18 收到

[†] email: wshuang@ustc.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20250803

CSTR: 32040.14.wl20250803

Overcoming channel noise in optical fiber quantum communication

FAN-YUAN Guan-Jie XIE Wei-Xin WANG Shuang[†] HAN Zheng-Fu

(Key Laboratory of Quantum Information, Chinese Academy of Sciences, School of Physical Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

摘要 量子通信利用量子态承载并传输信息, 相比于现代通信中电磁波等确定性的信息载体, 量子态的不可克隆、测量塌缩等特性使其具备窃听感知能力。然而, 单光子水平的量子态极易受到外界干扰, 是量子通信实用化的主要挑战之一。文章围绕光通信中常用的光纤信道, 主要介绍信道因色散、非线性和环境因素对量子通信系统的干扰问题。针对在时间、偏振、相位等维度的干扰, 回顾量子通信中主要的抗干扰手段, 并结合发展需求进行简要讨论。

关键词 量子通信, 光纤, 噪声, 抗干扰

Abstract Quantum communication utilizes quantum states to carry and transmit information. Compared to deterministic information carriers such as electromagnetic waves in modern communication, the unique properties of quantum states, such as the no-cloning theorem and measurement-induced collapse, enable the detection of eavesdropping. However, quantum states at the single-photon level are highly susceptible to external disturbances, making practical implementation of quantum communication a major challenge. This paper focuses on optical fiber channels, which are commonly used in optical communication, and describes the main sources and mechanisms of channel interference; the key anti-interference techniques in quantum communication are then reviewed.

Keywords quantum communication, optical fiber, noise, anti-interference

1 引言

数万年前, 生活在太行山地区的智人凭借呼喊和敲击向同伴传递信息, 他们必须用力发出声音, 防止声音被流水和狂风所掩盖^[1]。数千年前, 春秋战国时期的士兵在木牍上书写文字, 通过邮

差向家人传信, 这种延续自商周时期的邮传制度建立了覆盖全国的通信网络^[2]。数百年前, 交子在华夏大地广为流通, 纸张的发明大大提高了信息的承载容量^[3]。数十年前, 地球两端的用户已可以通过电话电报系统进行实时语音通话, 在电缆中传输的信号显著缩短了信息传递的时间^[4]。如今, 高速光纤网络已走进千家万户, 超大带宽、超低延时的信息通道连接起每一个人^[5]。

* 国家自然科学基金(批准号: 62425507)资助项目

从声音到文字，从木简到光电，信息以确定性的方式进行传播。它可以被重复读取，可以被任意复制，信息的防伪和保密问题始终是人们关注的焦点。当下，将信息加载在单个光子上的量子通信正为人所熟知。单光子这种具备不可克隆、测量塌缩等量子特性的信息载体，可以从原理上解决信息的防护问题。

然而，量子优越性的另一面是它的脆弱性。量子是能量的最小不可分单位，普通灯光的一次闪烁就有上亿个光子的起伏，如此微弱的信号很容易被光纤信道的噪声所淹没。我们似乎又回到了几万年前的智人时代，但问题更加严峻——为了保持量子的优越性，我们无法像智人那样让量子信号变得更强。围绕信道噪声的识别、过滤和处理，研究人员开展了一系列工作。

2 光纤信道中的干扰

2.1 光纤

如同水可以在水管中流淌，电可以在电缆中传输，光纤是一种利用光的全反射原理传输光信号的通道。光纤通常由玻璃或塑料纤维制成，由纤芯和包围在纤芯外部的包层组成。纤芯和包层采用折射率不同的材料，从而实现光的全反射传播。早在17世纪，开普勒就提出了光的内全反射概念，他利用实验论证了当光从玻璃射向空气时，如果入射角大于 42° ，光会全部反射回玻璃而不会进入空气，这就是全反射现象。19世纪，丁达尔利用全反射原理，演示了光会顺着木桶侧壁流出的水柱传播，光导纤维的概念逐渐成熟。20世纪60年代，英国华裔科学家高锟提出用玻璃纤维中传输的光替代金属导线中传输的电信号，并指出了降低光纤损耗的重要方向，成功将光纤损耗从每千米上千dB降低到数dB，解决了光纤的实用化问题。1970年，康宁公司成功制备出第一根17 dB/km的低损耗光纤，达到了高锟所预计的目标。4年后，贝尔实验室将这一数值降低到2 dB/km，此后光纤通信进入快车道。2009年，高锟先生因“有关光在纤维中的传输以用于光学

通信方面”所作出的突破性成就，与美国科学家分享了当年的诺贝尔物理学奖。

现代通信中常用光纤的纤芯直径在 $9\text{ }\mu\text{m}$ 左右，包层直径约为 $125\text{ }\mu\text{m}$ ，这个尺寸可以避免粘连和断裂。为了制作这样的结构，人们采用了光纤预制棒拉丝的方法。光纤预制棒与光纤的结构相同，是光纤的放大版，其直径通常在30—40 mm，可以通过化学气相沉积等方法制作。预制棒纤芯和包层的尺寸、折射率关系与光纤一致，纤芯可以通过掺杂提高折射率，以满足全反射条件。拉丝时，预制棒被加热软化，然后通过机械装置拉伸。随着预制棒被不断拉长，其直径也不断变细。通过精确控制，可以将预制棒逐渐拉细至光纤尺寸，并经过冷却、涂覆等工艺，制作出更加结实耐用的光纤^[5]。

从上述制作过程可以看出，材料的纯度、折射率、拉伸工艺会极大影响光纤的性能。对于量子通信而言，主要有三类非理想特性影响比较显著：色散、非线性效应、环境特性。色散使得进入光纤的信号会随传播距离的增加在时域上展宽，非线性效应则是指在光信号功率较高时产生的四波混频、散射等现象，环境特性指的是光纤在应力、温度变化时产生的折射率变化。有些特性在经典光通信中已被人们所关注，例如材料色散问题，经典光通信中已有色散补偿等应对方法，也同样适用于量子通信。本文主要探讨量子通信更为关注的问题。

2.2 色散

色散是一种由材料本征特性引起的非理想特性，其特征是不同模式的光场在介质中传播速度不同。最常见的色散发生在频率维度。设想一个光脉冲进入光纤，起初各频率分量的光在时域上重叠在一起，光脉冲整体展现出半高宽较窄的时域特性。随着光脉冲在光纤中的传播，不同传播速度的频率分量逐渐拉开距离，最终导致光脉冲在时域上整体展宽。这种展宽对于高速量子通信系统是非常不利的。这类系统中光脉冲的半高宽很窄，对应的探测窗口也很窄，同时重复频率很

偏振模色散对不同编码体制的量子通信系统的影响机理不同。对于偏振编码体制, 信息被编码在不同的偏振态上, 不同偏振态对应不同的比特。受偏振色散的影响, 偏振态在传播中会逐渐变化为其他偏振态, 具体表现为在庞加莱球上的移动。这使得原本编码的水平偏振光可能发生旋转或变为椭圆偏振光, 从而在解码时被映射到其他比特, 造成系统错误。对于相位编码体制, 经典信息被编码在不同的相位上, 这个相位通常由两个相邻脉冲的相对相位承载。由于这两个相邻脉冲几乎是同时传输, 光纤的影响也是共同作用,

2.3 非线性效应

上述讨论的前提均是强光入射，但量子通信的光信号通常在光子量级，那强光是如何而来呢？事实上，完整的量子通信不仅要传递量子光，还需要传递较强的经典光用于时间同步、数据后处理等。因此，量子通信是一种既有量子光也有经

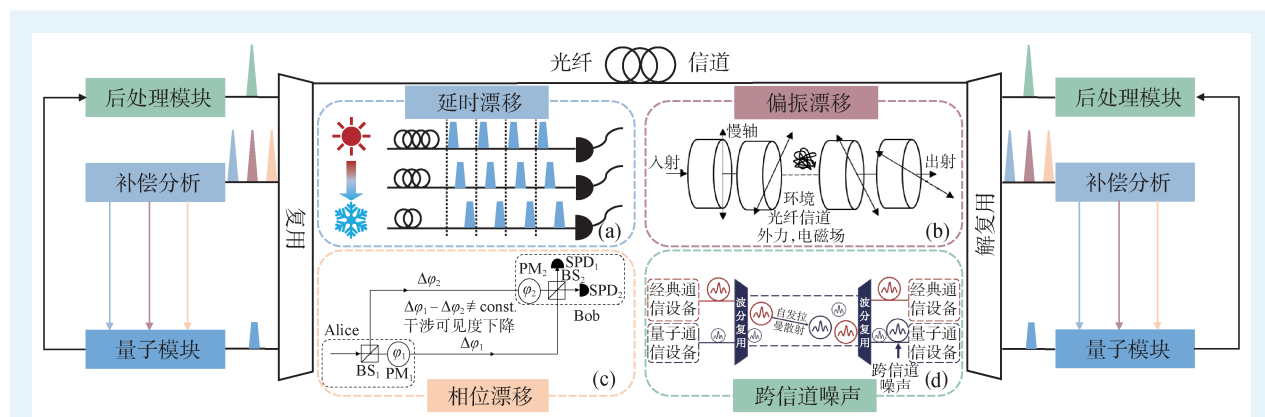


图1 光纤信道中存在的噪声源。完整的量子通信系统包括量子模块、补偿模块以及后处理模块。量子模块完成量子态的制备、传输以及测量。补偿模块和后处理模块通常为经典通信系统,补偿模块通过对系统状态进行分析,决定如何对系统进行校正,后处理模块根据不同的通信协议对量子模块产生的原始数据进行处理,实现完整的量子通信。光纤环境中的延时、偏振、相位的不稳定性以及经典光串扰是主要的噪声来源(图中BS为分束器,PM为相位调制器,SPD为单光子探测器)

典光传输的通信方式。同时,量子通信无法完全取代现有的经典通信,考虑到光纤资源有限,通常需要在同一根光纤中同时传输量子通信和经典通信的信号。这些信号可以通过波分复用、时分复用等方式同时传输。

尽管由非线性效应激发的光相比经典光本身较弱,但量子光本身也很弱,所以经典光产生的非线性效应将对量子光带来较大影响。这种影响的主要来源是拉曼散射,图1(d)刻画了这一类噪声在经典—量子共纤同传过程中的产生和作用机理。

拉曼散射是由光在介质中传输时伴随的介质分子能级跃迁产生的。当发生基态分子向激发态跃迁时,入射光子的一部分能量用于跃迁到激发态上,此时出射光子频率降低,该光子称为斯托克斯光子。当吸收光子的分子原本就处于激发态时,有一定概率跃迁到基态,此时释放能量给发射光子,则发射光子相较于入射光子频率升高,又称为反斯托克斯光子。从原理可以看出,拉曼散射的频移量与介质中的分子能级结构有关。由于分子能级结构通常很复杂,再加上光纤中的杂质成分,拉曼散射的宽度通常可以达到40 THz。对于常用的波分复用系统而言,密集波分的频率间隔通常只有50—100 GHz。此时一个通道的拉曼散射光会污染其他通道,从而产生错误信号,这也叫做串扰。

除了拉曼散射,布里渊散射、四波混频等非线性效应也会产生一定影响,但由于其散射光谱较窄,在一般波分间隔下难以发生串扰,因此不再做详细描述。

2.4 环境特性

光纤网络的实际铺设环境十分复杂,埋地、架空、海底等方式或环境均铺设光缆,因此光纤不可避免地会受到外力作用和温度变化的影响。当光纤受到力热作用时,有两个物理量的变化会使量子通信系统产生错误,一是折射率,二是延时。

在外力的作用下,光纤局部会发生挤压或拉伸,折射率会在力的作用下发生改变。由于外界

施加的力总是不均匀的,因此光纤产生的折射率变化也是不均匀的。这种现象与因光纤拉制过程中内应力造成的折射率改变本质上是一样的,因此对量子通信系统的作用机理也与上文的叙述是一致的,在相位编码系统中会引起相位漂移,如图1(c)所示。不过相比应力释放,外力和温度的变化更为剧烈,带来了更多不确定性。

在温度作用下光纤的延时也会发生变化,从而导致信号传输延时发生改变。光纤延时随温度的变化可以通过温度漂移系数来表示,其单位为ps/km/K,具体数值取决于制造工艺和材料。对于常用的单模光纤,其温漂系数一般为40 ps/km/K,低温漂的稳相光纤可低于10 ps/km/K。这意味着,温度变化1 °C,100 km的光纤延时将变化1 ns以上。而对于量子通信系统来说,脉冲宽度常小于百皮秒,重复周期亦在纳秒量级。如图1(a)所示,当延时变化超过脉冲宽度时,接收端将失去与信号的同步,当超过重复周期时,探测信号将发生错位,从而产生误码。

除上述常规环境之外,某些特殊场景还存在其他噪声源。如在电力通信网中架设量子通信链路时需要考虑强电磁辐射对量子态的影响,最为典型的是磁光效应对偏振态的影响^[6]。当偏振光通过强电磁环境的光纤传输时,偏振光的振动面会发生一定角度的旋转,这将提高偏振编码量子通信的误码率。

3 光纤信道抗干扰方法

光纤信道对于量子通信系统的干扰从信噪比的角度可以分为两个方面,一方面信道会在到达时间、相位、偏振等维度使量子态产生偏移,降低了量子态的保真度,另一方面信道还会提高底噪,产生额外的错误信号。因此应对措施也分别针对这些问题展开。

3.1 时间跟踪

外界环境对光纤的影响可能导致光信号到达时间的漂移,这不仅会带来低质量的解码,更可

能导致错误的信息比对, 提高误码。解决这一问题的核心在于监控光信号的时间特性, 并进行时延补偿。

传统的方案倾向于做“加法”, 即通过同步光来实现收发两端的同步^[7]。同步光和量子光来源于两个同步触发的激光器, 一路进行量子态编码并衰减到单光子量级, 另一路保持较高的功率输出。两类光信号利用波分复用的方式在光纤中传输。同步信号被光电探头测量, 量子信号解码后被单光子探测器测量。同步光与量子光经历了相同的信道环境, 可以作为时间参考, 同时其强光特性在探测时较为可靠。但在这样的强—弱组合下, 弱光系统必然牺牲部分性能。光纤非线性效应使得强的同步光所产生的跨信道光子将作为噪声进入量子测量端, 抑制分发性能。

那么, 强的辅助光是否必须? 系统能否精简? 只做软件层面的改良是否可行? 这催生了基于量子比特的同步方案, 即利用量子资源来实现时间跟踪。2020年提出了Qubit4Sync方案^[8], 给每个数据帧前加入一串特殊的比特序列, 测量端通过在不同时延下计算接收序列与公开序列的相关性来实现同步。该方案并未涉及到量子通信系统硬件方面的改动, 具有良好实用价值。然而, 同步序列的集中分布会导致同步失败时一整个帧数据失效; 并且同步序列实际上压缩了随机序列的分发的时间, 在高衰减下更甚。对此, 2023年分布式量子比特同步的改进方案被提出^[9], 通过将同步序列拆散均分, 缓解了上述问题。相关方案示意可参考图2(a)。

3.2 相位补偿

光纤信道的状态变化同样影响基于干涉现象的量子

通信过程。其中的一个典型例子就是基于相位编码的量子密钥分发系统。相位编码量子密钥分发方案于1992年提出, 并且以等臂马赫—曾德尔干涉仪(MZI)为基本编解码结构^[10]。收发端分别通过在两臂对光子脉冲进行相位调制实现单光子干涉。等臂的结构使得收发端同时被两条光纤信道连接, 一定程度上增加了系统的复杂度。更重要的在于等臂结构对光纤长度误差提出了极高的要求, 光纤长度的差异不仅导致干涉光无法重合, 更由于光程差的不同带来相位的漂移, 从而降低干涉可见度, 提高系统误码, 在长距离光纤条件下尤为显著。而后, 不等臂MZI方案被提出^[11], 只要求收发端数米长的光纤保持长度差恒定, 简化了系统并提高了鲁棒性。同时, 光纤存在的双折射效应使得光子在传输过程中的偏振状态是不断变化的, 偏振状态的变化也会影响干涉效果。对此, 研究人员基于法拉第镜对偏振的自补偿作用, 对不等臂MZI方案进行改进, 提出了法拉第一迈克尔孙干涉仪(FMI)方案^[11], 实现了一种与环境无关

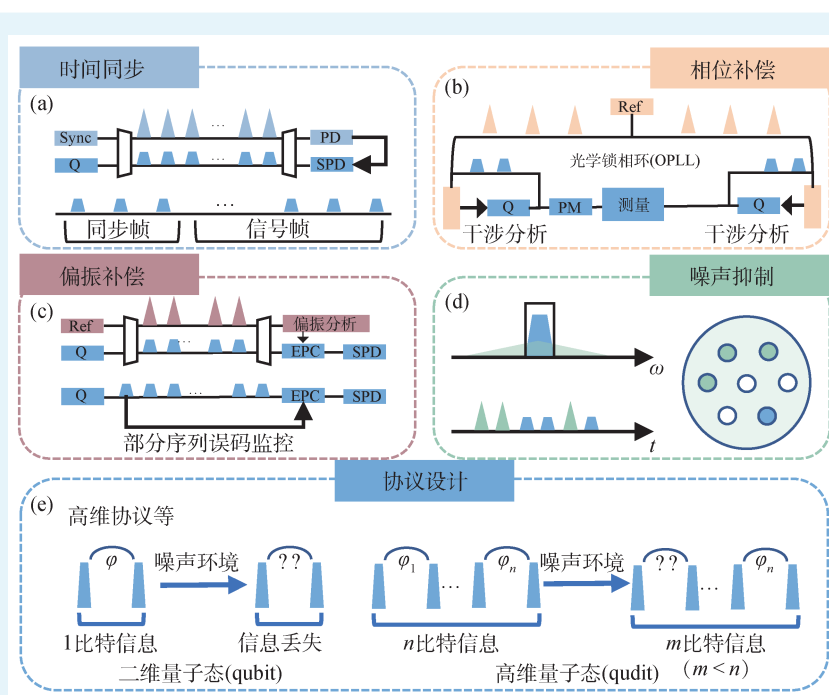


图2 光纤量子通信系统中的抗噪声方案 (a)辅助链路和共纤链路的同步帧方案; (b)双场量子通信协议中的相位补偿方案; (c)辅助链路的偏振监控以及同一链路冗余信息的偏振监控方案; (d)经典—量子共纤同传场景下频域、时域以及空间滤波方案; (e)高维协议对环境噪声的容忍(Sync: 同步光模块; Q: 量子模块; PD: 光电探头; SPD: 单光子探测器; Ref: 参考光模块; EPC: 电控偏振控制器; PM: 相位调制器)

的干涉环结构,进一步提升了干涉型量子密钥分发系统对环境的鲁棒性。

除此之外,以双路通信为特点的“即插即用”系统也在相位稳定方面体现出优势^[12],系统由接收方提供强脉冲,在发送方处编码后再发回接收方解码,其特殊的结构无需复杂的主动补偿回路来处理相位漂移。近年来新发展的测量设备无关类量子通信系统也具有较高的相位稳定性需求。在图2(b)中以双场(TF)协议为例,为保证高质量的单光子干涉,要求通信双方发送的光脉冲具有恒定的相位差,相位差的偏移来源于两部分,独立激光器的频率漂移和独立链路的光纤长度漂移。除了常规的相位调制器补偿之外,近年来还发展出一系列锁相技术,例如:光学锁相环(OPLL)^[13],其本质为一个频率反馈系统,通过将测量端发出的参考光和本地光进行干涉确定频差;通过超稳腔实现独立激光器的频率稳定^[14];通过光频梳^[15]或原子气体吸收谱的频率标定^[16]等等。

3.3 偏振补偿

光纤信道存在的双折射特性导致了其对偏振态的保持能力较差。当信息被编码在偏振维度时,这对接收端态的保真度是极大的威胁,对于全同光子干涉的协议(如测量设备无关协议),偏振态的漂移也会导致干涉可见度的下降,提高误码。更进一步,许多光学器件具有偏振相关特性,混乱的偏振状态也会影响此类器件的正常工作。有效的偏振坐标系补偿方法是支持量子通信系统稳定运行的重要因素。如图2(c)所示,目前偏振补偿方法主要分为中断式补偿系统和实时补偿系统。

中断式系统在中断量子态传输后发送参考光对信道中的偏振进行反馈控制。接收方通过误码监控模块监控误码水平。误码高于阈值,停止量子态传输,此时发送方编码特殊的公开比特序列,接收方根据探测器的计数调节偏振至坐标系对准。其优点在于系统复杂度不高,参考光对量子光没有时序上的影响。但不足在于对准会占用量子态传输的时间,降低通信效率,也无法应对快速的偏振变化场景。实时系统无需中断密钥分发,利

用辅助光资源进行偏振补偿。参考光和量子光以某种方式复用(如波分复用和时分复用),以参考光为反馈来补偿信道偏振变化。实时方案可追踪更快速的信道偏振变化,但却显著地提高了系统的复杂度,同时复用的强光信号对量子系统的影响较大。

那是否可以直接从量子信号中提取偏振信息?单光子量级的偏振坐标补偿方法^[17]回答了这一问题。其通过量子态在分发过程中冗余的通信数据来提取偏振信息,具象化为以矩阵距离为基础的目标函数,对系统进行补偿。在实验验证中,该方案实现了24小时内2.5 MHz重频的BB84系统中2.32%的平均误码率保持。对于更高速的系统,由于数据积累速率的提升,该方案的反馈周期可进一步缩减,更加适配快速补偿需求。

3.4 压制背景噪声

量子系统运行时常伴经典通信,这源于协议需求,如基矢匹配、后处理交互,以及反馈系统的经典参考光,可见量子系统离不开经典通信辅助。然而,在量子—经典共存系统里,强经典光对微弱量子光是不可忽视的噪声激发源。在量子—经典复用场景下,研究人员提出频域、空间、时间滤波方案以降低经典光影响,结合图2(d)中的图像,我们分别对这三种滤波方案展开介绍。

频域滤波方案着眼于压窄进入探测器的频域宽度,在器件方面依赖波分复用器本身对不同频率信道的隔离度,辅助以带通滤波器。这种“力大砖飞”的思想诚然有效,但受到器件性能的限制。更优雅的方案关注噪声的频率特性,通过信道分配方案来实现降噪。如自发拉曼散射噪声频率谱围绕泵浦光频率向外部延伸呈现先增强后减弱的趋势,展现为斯托克斯峰和反斯托克斯峰^[18]。很明显,将量子信道放置在这两个峰上是不讨巧的,其余低强度的频率区间是更优的选择。

空间滤波方案的提出伴随于当下多芯多模光纤的发展,其增加了空间维度的隔离,并且多维

度联合复用可以进一步提高维度资源的利用率。2016年,空间滤波的方案首先在一条53 km的多芯光纤上得到验证,其实现了量子系统与10 Gbps双向经典通信的同传^[19]。同时空间滤波的资源利用潜力也被发掘,2022年,研究人员利用多芯光纤实现了频率间隔仅为1.6 nm的量子—经典共纤同传^[20],相当于密集波分复用相邻信道的频率间隔。

时域滤波方案更具有趣味性。此类方案利用信号光子和噪声光子时域上的差异实现信噪比的增强。2011年,时域滤波技术首先在量子接入网架构中被尝试,通过同步量子与经典信号,在经典信号序列的“拉曼坑”中插空安置量子信号,信噪比由此提升^[21]。但从另一个角度看,时间上的随机意味着噪声光子更不易被门控探测器探测。2012年,研究人员利用极窄门宽(约100 ps半高)的门控自差分雪崩单光子探测器实现了信号光子与噪声光子之间9.4 dB的探测效率差异,在90 km光纤上实现了量子系统与千兆比特每秒(Gbps)经典通信的同传^[22]。

3.5 提高噪声容忍度

为抵御光纤信道所带来的各类噪声,各类针对性的系统方案被提出,通过附加抗干扰模块,量子通信已经逐步踏上实用化的轨道。另一方面,量子通信协议自身的抗干扰强化,可以从理论层面提升系统抗干扰能力,是实用化道路上不可缺少的一环。对此,多种具备免疫干扰特性的量子通信协议也被设计出来,具象化的表述可参考图2(e)中的内容。

随着光纤状态的变化,通信双方的参考系也可能随之改变,额外添加反馈系统增加了系统复杂度并可能引入安全漏洞。参考系无关(RFI)协议^[23]通过额外增加一组基矢的制备和测量,并构建与参考系偏移无关的中间量来估计安全信息量,解决了这一问题,移除了冗余的参考系校正操作。基于此协议上的改进,目前RFI协议的最远传输距离已经达到250 km^[24]。同时结合测量设备无关

(MDI)协议,RFI-MDI协议也在实验上得到了验证^[25],并进行了网络化的探索^[26]。

对抗噪声的又一思路是通过冗余信息来提升对噪声的容忍能力,其代表为高维协议。此类协议通过在更高维度上的编码,实现单位时间内更多比特信息的传递,即使部分信息因噪声而失真,仍有足够的有效信息用于生成密钥。在制备测量协议方面,目前已发展出RRDPS^[27]、Chau15^[28]等高维量子通信协议。在纠缠协议方面,高维协议的探索也蓬勃发展。2021年,高维子空间纠缠协议^[29]提出,平衡了态制备水平和抗噪声能力之间的关系,并于2023年进行了自由空间的实验验证^[30]。此后,光纤版本的实验也随之推出^[31],再次证明高维协议在抗噪声方面的优势。

后处理方案作为协议的一部分,相关的改进只涉及软件方面的变更,也具有一定潜力。在2008年,已经有学者提出可以通过优势提取技术进一步提升协议的安全信息量^[32]。该技术通过奇偶校验方法大幅降低原始数据的比特误码,且仅以微弱的相位误码提升为代价。但此类方案只在高误码情况下展现出优势,近年来对抗噪声能力的需求更加急迫,该方案与各类协议结合^[33],展现了其强大的兼容性和抗噪声能力。

4 总结与展望

本文介绍了光纤信道对量子通信系统的主要干扰机制及相应的应对措施。从机理上看,光纤信道的干扰源于自身材料特性和应用场景,难以从源头消除,因此应对措施主要围绕如何降低干扰对量子通信质量的影响展开。这些措施一方面从实际系统出发,通过隔离、补偿等物理手段降低影响,另一方面从理论协议出发,从方法上提高噪声容忍能力。总的来说,随着人工智能、大数据对数据生成和处理需求呈指数级增长,为应对高并发、高吞吐量的实时数据处理任务,量子通信所面临的带宽和抗干扰压力将越来越大,高速稳定传输和实际信道干扰的矛盾问题将是贯穿量子通信实用化的主线。

参考文献

- [1] 陈哲英. 化石, 1987, 2: 27
- [2] 孙志平. 中国邮政, 1983, 2: 21
- [3] 刘方健, 罗天云. 千年交子与中国货币金融. 成都: 西南财经大学出版社, 2024. p. 45
- [4] 毛春波. 电信技术发展史. 北京: 清华大学出版社, 2016. p. 67
- [5] Kanamori H. SEI Technical Review, 2020, 91: 15
- [6] 叶萌, 黄观金, 于国际 等. 光通信技术, 2020, 44: 56
- [7] Korzh B, Lim C C W, Houlmann R *et al.* Nat. Photonics, 2015, 9: 163
- [8] Calderaro L, Stanco A, Agnesi C *et al.* Phys. Rev. Appl., 2020, 13: 054041
- [9] Chen Y, Huang C, Lin G *et al.* J. Lightwave Technol., 2024, 43: 1
- [10] Bennett C H. Phys. Rev. Lett., 1992, 68: 3121
- [11] Mo X F, Zhu B, Han Z F *et al.* Opt. Lett., 2005, 30: 2632
- [12] Muller A, Herzog T, Huttner B *et al.* Appl. Phys. Lett., 1997, 70: 793
- [13] Wang S, Yin Z Q, He D Y *et al.* Nat. Photonics, 2022, 16: 154
- [14] Zhou L, Lin J, Xie Y M *et al.* Phys. Rev. Lett., 2023, 130: 250801
- [15] Zhou L, Lin J, Ge C *et al.* Phys. Rev. Appl., 2024, 22: 064057
- [16] Chen J P, Zhou F, Zhang C *et al.* Phys. Rev. Lett., 2024, 132: 260802
- [17] Ding Y Y, Chen W, Chen H *et al.* Opt. Lett., 2017, 42: 1023
- [18] Eraerds P, Walenta N, Legré M *et al.* New J. Phys., 2010, 12: 063027
- [19] Dynes J, Kindness S, Tam S B *et al.* Opt. Express, 2016, 24: 8081
- [20] Geng J Q, Fan-Yuan G J, Li K J *et al.* Opt. Lett., 2022, 47: 3111
- [21] Choi I, Young R J, Townsend P D. New J. Phys., 2011, 13: 063039
- [22] Patel K A, Dynes J F, Choi I *et al.* Phys. Rev. X, 2012, 2: 041010
- [23] Laing A, Scarani V, Rarity J G *et al.* Phys. Rev. A, 2010, 82: 012304
- [24] Liu X, Luo D, Luo Z *et al.* Phys. Rev. Appl., 2024, 22: 064018
- [25] Wang C, Song X T, Yin Z Q *et al.* Phys. Rev. Lett., 2015, 115: 160502
- [26] Fan-Yuan G J, Lu F Y, Wang S *et al.* Optica, 2022, 9: 812
- [27] Wang S, Yin Z Q, Chen W *et al.* Nat. Photonics, 2015, 9: 832
- [28] Chau H. Phys. Rev. A, 2015, 92: 062324
- [29] Doda M, Huber M, Murta G *et al.* Phys. Rev. Appl., 2021, 15: 034003
- [30] Bulla L, Pivoluska M, Hjorth K *et al.* Phys. Rev. X, 2023, 13: 021001
- [31] Zhong Z Q, Zhan X H, Chen J L *et al.* Optica, 2024, 11: 1056
- [32] Renner R. Int. J. Quantum Inf., 2008, 6: 1
- [33] Li H W, Zhang C M, Jiang M S *et al.* Commun. Phys., 2022, 5: 53

读者和编者

订阅《物理》得好礼

——超值回馈《岁月有情》
——<物理> 50周年纪念本

为答谢广大读者长期以来的关爱和支持,《物理》编辑

户名: 中国科学院物理研究所
帐号: 11 250 1010 4000 5699
(请注明《物理》编辑部)
咨询电话: 010-82649029; 82649277
Email: physics@iphy.ac.cn

部特推出优惠订阅活动: 凡直接向编辑部连续订阅2年《物理》杂志, 将获赠《岁月有情——<物理> 50周年纪念本》。内有自1972年至2022年《物理》发表的50篇精选文章信息, 扫描对应的二维码, 可重温经典之作, 感悟物理科学的真谛, 领略学科大家的风采。

希望读者们爱上《物理》!

订阅方式(编辑部直接订阅优惠价180元/年)

(1) 邮局汇款

收款人地址: 北京市中关村南三街8号
中国科学院物理研究所, 100190

收款人姓名: 《物理》编辑部

(2) 银行汇款

开户行: 农行北京科院南路支行

