

## 基于软件定义量子通信的自由空间量子通信信道参数自适应调整策略

卫容宇 聂敏 杨光 张美玲 孙爱晶 裴昌幸

### Parameters adaptive adjustment strategy of quantum communication channel in free-space based on software-defined quantum communication

Wei Rong-Yu Nie Min Yang Guang Zhang Mei-Ling Sun Ai-Jing Pei Chang-Xing

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 68, 140302 (2019) DOI: 10.7498/aps.68.20190462

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190462>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

PM2.5大气污染对自由空间量子通信性能的影响

Influences of PM2.5 atmospheric pollution on the performance of free space quantum communication

物理学报. 2015, 64(15): 150301 <https://doi.org/10.7498/aps.64.150301>

非球形气溶胶粒子及大气相对湿度对自由空间量子通信性能的影响

Influences of nonspherical aerosol particles and relative humidity of atmosphere on the performance of free space quantum communication

物理学报. 2016, 65(19): 190301 <https://doi.org/10.7498/aps.65.190301>

基于量子隐形传态的量子保密通信方案

Quantum communication scheme based on quantum teleportation

物理学报. 2017, 66(23): 230303 <https://doi.org/10.7498/aps.66.230303>

基于光量子态避错及容错传输的量子通信

Quantum error rejection and fault tolerant quantum communication

物理学报. 2018, 67(13): 130301 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180598>

量子直接通信

Quantum secure direct communication

物理学报. 2015, 64(16): 160307 <https://doi.org/10.7498/aps.64.160307>

基于纠缠态的量子通信网络的量子信道建立速率模型

Quantum channel establishing rate model of quantum communication network based on entangled states

物理学报. 2015, 64(4): 040301 <https://doi.org/10.7498/aps.64.040301>

# 基于软件定义量子通信的自由空间量子通信信道参数自适应调整策略\*

卫容宇<sup>1)†</sup> 聂敏<sup>1)</sup> 杨光<sup>1)2)</sup> 张美玲<sup>1)</sup> 孙爱晶<sup>1)</sup> 裴昌幸<sup>3)</sup>

1) (西安邮电大学通信与信息工程学院, 西安 710121)

2) (西北工业大学电子信息工程学院, 西安 710072)

3) (西安电子科技大学, 综合业务网国家重点实验室, 西安 710071)

(2019年3月31日收到; 2019年4月26日收到修改稿)

自由空间量子通信会受到雾霾、沙尘、降雨等自然环境的干扰. 为提升环境干扰下量子通信的性能, 本文提出了基于软件定义量子通信 (software defined quantum communication, SDQC) 的自由空间量子通信信道参数自适应调整策略. 该策略通过对环境状态实时监测, 根据预置在应用层的程序, 对量子初始状态及单量子态存在时间等相关参数进行自适应调整, 提高自然环境背景干扰下自由空间量子通信系统的保真度. 仿真结果表明, 在退极化、自发幅度衰变及相位阻尼三种噪声信道参数取值不同时, SDQC 系统参数的最佳取值也不同. 系统根据环境变化及业务需求, 自适应地选择量子初始状态及单量子态存在时间, 使量子保真度在通信过程中始终保持在峰值, 有效提升了量子通信系统的适应能力及综合免疫力.

**关键词:** 自由空间量子通信, 软件定义量子通信, 量子态, 保真度

**PACS:** 03.67.Hk, 03.67.-a

**DOI:** 10.7498/aps.68.20190462

## 1 引言

自由空间量子通信是量子信息领域的热点之一, 是量子卫星通信的基础. 在这个领域, 国内外的科学团队已取得了很多成就<sup>[1-2]</sup>. 2016年, 我国成功发射“墨子号”量子实验卫星<sup>[3]</sup>, 使量子卫星通信走向现实和应用, 也为全球量子通信网络的构建提供了理论和实验基础. 目前, “墨子号”量子实验卫星仅能在特定天气情况下完成通信实验, 这是由于量子信息在自由空间传输时, 会不可避免地受到自然环境如雾霾、沙尘、降雨等的干扰, 对此, 相关研究工作已经展开.

文献 [4] 定量分析了不同程度的 PM<sub>2.5</sub> 大气污染对自由空间量子通信性能的影响; 文献 [5] 研究了中尺度沙尘暴对量子卫星通信的影响; 文献 [6] 研究了雷暴雨对星地量子链路性能的影响; 文献 [7] 研究了大气湍流对量子卫星通信链路的影响; 文献 [8] 研究了冰水混合云对自由空间量子信道的影响; 文献 [9] 研究了中纬度地区电离层偶发 E 层对量子卫星通信链路衰减作用; 文献 [10] 定量研究了灰霾粒子与水云粒子不同混合方式对量子卫星通信性能的影响; 文献 [11] 研究了空间尘埃等离子体对量子卫星通信性能的影响; 文献 [12] 研究了非球型气溶胶粒子及大气相对湿度对自由空间量子通信性能的影响. 以上研究仅分析了各种环境干扰对

\* 国家自然科学基金 (批准号: 61172071)、陕西省国际科技合作与交流计划项目 (批准号: 2015KW-013) 和陕西省教育厅科研计划项目 (批准号: 16JK1711) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: 353504371@qq.com

量子通信性能的影响, 没有提出解决这些问题的策略. 要实现量子卫星通信走向应用, 就必须解决星地间的 24 h 全天候通信这一难题, 它决定了量子卫星通信系统的生存性和能否可持续发展的问題, 具有十分重要的意义.

软件定义网络 (software defined network, SDN) 的概念由 Mckeown 教授于 2009 年正式提出 [13]. SDN 利用分层的思想将数据与控制分离, 它最大的特点是具有开放性和可编程性, 目前已在网络虚拟化 [14]、无线局域网 [15]、数据中心网络 [16] 和云计算 [17] 等领域得到应用. 本文为解决量子通信系统的生存性问题, 提升自由空间量子通信保真度, 结合 SDN 的思想, 提出了软件定义的量子通信 (software defined quantum communication, SDQC) 系统模型, 并基于该模型提出了一种自由空间量子通信信道参数自适应调整策略. 该策略能够增强自由空间量子通信的抗环境干扰能力, 为量子卫星通信系统的健康发展奠定理论基础.

## 2 SDQC 系统

为了解决雾霾、沙尘、降雨等自然环境背景干扰下自由空间量子通信的生存性问题, 我们提出了 SDQC 模型. SDQC 系统可以根据不同类型、程度的环境干扰, 通过软件程序, 自适应地修改量子通信系统的各项参数, 对系统的相关参数进行调整, 具有灵活、方便、适应性强、应用范围广的优点. SDQC 体系的架构如图 1 所示.

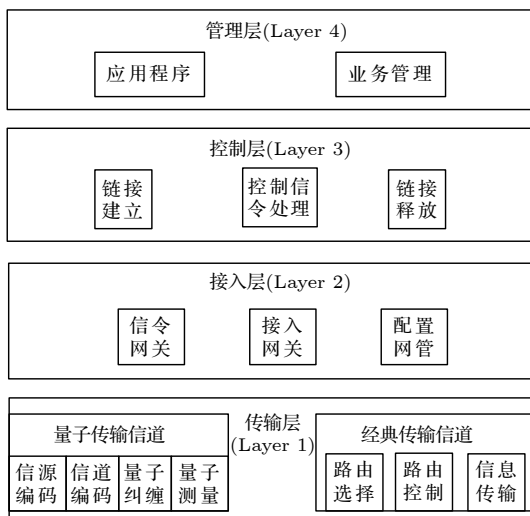


图 1 SDQC 系统分层模型

Fig. 1. Hierarchical model of the SDQC system.

层 1 是传输层, 为量子通信提供传输信道, 进行数据的传输, 可根据沙尘、雾霾等环境变化, 在控制层的指令下进行信道参数调整.

层 2 是接入层, 包括各种量子网关、量子交换机等相关设备, 负责数据的处理、转发和状态信息的收集.

层 3 是控制层, 负责量子控制、信令监测等功能; 它通过与接入层间的接口获取底层的基础状态信息, 并对整个网络的拓扑和状态信息进行实时的监测、维护及自适应调整; 同时它也为管理层提供可扩展的编程接口.

层 4 是管理层, 负责对业务分类, 完成路由管理、资源分配等任务; 并为用户提供各类基于 SDQC 的应用程序, 用户无需关心底层的技术架构, 只需通过编程就可实现各类应用的部署.

本文中, SDQC 系统通过对信道状态的实时监测, 将信息反馈给管理层, 管理层根据环境对量子信道影响的因素及程度的变化, 向控制层下发指令, 对信道参数进行自适应调整, 提升自由空间量子通信信道纠缠度及保真度, 增强量子通信系统的抗干扰能力.

## 3 SDQC 系统在退极化、自发辐度衰变及相位阻尼信道下纠缠度与保真度分析

### 3.1 背景噪声下的量子纠缠度与保真度

在自由空间量子通信中, 由于自然环境的干扰, 携带量子信息的客体光子会不可避免地与环境发生相互作用, 两者发生量子纠缠, 光量子的量子态与背景环境量子态的复合系统会经过联合么正演化, 导致消相干 [18,19]. 引起消相干主要有三种因素, 即退极化、自发幅度衰变、相位阻尼. 一般情况下, 在量子信道中, 这三种因素共同作用影响量子通信性能.

背景环境与量子发生作用, 产生相互纠缠, 该过程等效为一个联合的么正变换, 使发送的初态  $|0\rangle, |1\rangle$  变为纠缠态, 即

$$\begin{cases} |e\rangle |0\rangle \rightarrow |e_0\rangle |0\rangle + |e'_0\rangle |1\rangle, \\ |e\rangle |1\rangle \rightarrow |e_1\rangle |1\rangle + |e'_1\rangle |0\rangle, \end{cases} \quad (1)$$

其中  $|e\rangle$  为背景环境干扰下等效量子态; 量子态  $\alpha |0\rangle + \beta |1\rangle$  的变为

$$|e\rangle(\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle) \rightarrow \alpha(|e_0\rangle|0\rangle + |e'_0\rangle|1\rangle) + \beta(|e_1\rangle|1\rangle + |e'_1\rangle|0\rangle). \quad (2)$$

设  $t$  为量子态在信道中持续时间,  $t = \sum_{i=1}^n \Delta t_i$ , 量子纠缠度  $F$  与保真度  $E$  的关系可表示为

$$E = \frac{F \cos(\theta + 2n\pi)}{\sigma \cdot \xi}, \quad (3)$$

其中  $\sigma$  为相位阻尼系数,  $\xi$  为环境的非均匀度,  $\theta$  为自旋比特初始态角度,  $F$  是保真度. 在 SDQC 模型下的自由空间量子通信中, 保真度为<sup>[20]</sup>

$$F(\rho, \varepsilon(\rho)) = \text{tr}(\sqrt{\rho\varepsilon(\rho)\rho})^{\frac{1}{2}}, \quad (4)$$

$\rho$  为初始量子态密度算符,  $\varepsilon(\rho)$  为量子态与背景环境干扰等效量子态  $|e\rangle$  相互作用后的密度算符.

### 3.2 SDQC 系统在退极化信道下的参数分析

设在退极化信道中初始量子态  $A$  为  $|\varphi\rangle_A = a|0\rangle_A + b|1\rangle_A$ , 其中  $\sqrt{a^2 + b^2} = 1$ ,  $p_d$  为量子位出错概率, 对正交基  $\{|e_+\rangle, |e'_+\rangle, |e'_-\rangle, |e_-\rangle\}$  求偏

迹<sup>[21]</sup>, 可得出 4 个 Kraus 算子:

$$\begin{cases} K_0 = \sqrt{1-p_d}I, & K_1 = \sqrt{\frac{1}{3}p_d}X, \\ K_2 = \sqrt{\frac{1}{3}p_d}Y, & K_3 = \sqrt{\frac{1}{3}p_d}Z, \end{cases} \quad (5)$$

其中  $I, Z, X, Y$  为 4 个基本算子. 若量子态  $A$  的初始密度矩阵为

$$\rho_A = \begin{pmatrix} \rho_{00} & \rho_{01} \\ \rho_{10} & \rho_{11} \end{pmatrix}, \quad (6)$$

令 SDQC 系统中, 量子初始状态密度矩阵

$$\begin{pmatrix} \rho_{00} & \rho_{01} \\ \rho_{10} & \rho_{11} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} |a|^2 & ab \\ ab & |b|^2 \end{pmatrix} \quad (7)$$

经过退极化信道后, 演化为

$$\varepsilon(\rho_A) = \begin{pmatrix} \left(1 - \frac{2}{3}p_d\right)\rho_{00} & \left(1 - \frac{2}{3}p_d\right)\rho_{01} \\ \left(1 - \frac{2}{3}p_d\right)\rho_{10} & \left(1 - \frac{2}{3}p_d\right)\rho_{11} \end{pmatrix}, \quad (8)$$

则对于退极化信道, 其保真度可表示为

$$F = \text{tr} \sqrt{\sqrt{\begin{pmatrix} \left(1 - \frac{2}{3}p_d\right)\rho_{00} & \left(1 - \frac{2}{3}p_d\right)\rho_{01} \\ \left(1 - \frac{2}{3}p_d\right)\rho_{10} & \left(1 - \frac{2}{3}p_d\right)\rho_{11} \end{pmatrix}} \begin{pmatrix} \rho_{00} & \rho_{01} \\ \rho_{10} & \rho_{11} \end{pmatrix} \sqrt{\begin{pmatrix} \left(1 - \frac{2}{3}p_d\right)\rho_{00} & \left(1 - \frac{2}{3}p_d\right)\rho_{01} \\ \left(1 - \frac{2}{3}p_d\right)\rho_{10} & \left(1 - \frac{2}{3}p_d\right)\rho_{11} \end{pmatrix}}} \\ = \sqrt{\left(1 - \frac{2}{3}p_d\right)a^4 + \left(2 - \frac{4}{3}p_d\right)a^2b^2 + \left(1 - \frac{2}{3}p_d\right)b^4}. \quad (9)$$

令  $\lambda_A = 1 - \frac{2}{3}p_d$ , 同上,  $a^2 = x, b^2 = y$ , 则有

$$F = \sqrt{\lambda_A(x^2 + y^2) + 2\lambda_A(xy)}. \quad (10)$$

SDQC 系统在退极化信道中, 量子态演化后量子保真度与  $p_d$  及参数  $x$  的关系如图 2 所示.

在退极化信道下, 量子保真度  $F$  随着量子位出错概率  $p_d$  的增大而减小. 在量子位出错概率一定时, 对所有概率而言, 参数  $x$  的取值为 0.5 时, 具有该量子位出错概率下的最大量子保真度. 当  $p_d = 0.2$  时, 随着  $x$  的取值从 0.1 增加到 0.5, 保真度  $F$  从 0.8921 增加到 0.9357.

### 3.3 SDQC 系统在自发幅度衰变信道下的参数分析

自发幅度衰变的运算算子可表示为

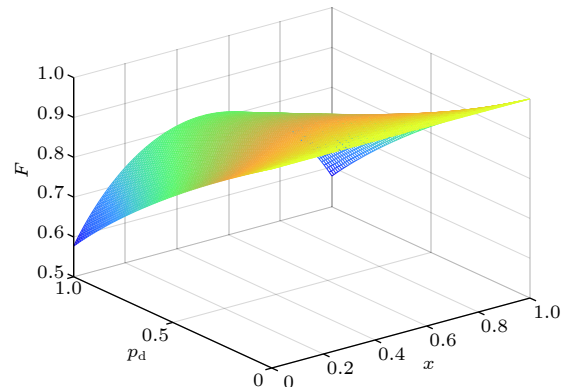


图 2 SDQC 在退极化信道下量子保真度与量子位出错概率  $p_d$  及参数  $x$  的关系

Fig. 2. Relationship between quantum fidelity, the probability of a qubit error  $p_d$  and parameter  $x$  of SDQC in depolarization channel.

$$T_\beta = \sum_\alpha \sqrt{\binom{\alpha}{\beta}} \sqrt{(1-p)^{\alpha-\beta} p^\beta} |\alpha-\beta\rangle \langle \alpha|. \quad (11)$$

设在自发幅度衰变信道中初始量子态  $B$  为  $|\varphi\rangle_B = a|0\rangle_B + b|1\rangle_B$ , 设初始量子态与背景环境下量子态以概率  $p_t$  发生跃迁, 其密度矩阵经过自发幅度衰变

变换为

$$\varepsilon(\rho_B) = \begin{pmatrix} 1 - (1-p_t)^n (1-\rho_{00}) & \rho_{01} (\sqrt{1-p_t})^n \\ \rho_{10} (\sqrt{1-p_t})^n & \rho_{11} (1-p_t)^n \end{pmatrix}. \quad (12)$$

对于自发幅度衰变信道, 其保真度可表示为

$$F = \text{tr} \sqrt{\sqrt{\begin{pmatrix} \rho_{00} + [1 - (1-p_t)^n] \rho_{11} & (1-p_t)^n \rho_{01} \\ (1-p_t)^n \rho_{10} & (1-p_t)^n \rho_{11} \end{pmatrix}} \begin{pmatrix} \rho_{00} & \rho_{01} \\ \rho_{10} & \rho_{11} \end{pmatrix} \sqrt{\begin{pmatrix} \rho_{00} + [1 - (1-p_t)^n] \rho_{11} & (1-p_t)^n \rho_{01} \\ (1-p_t)^n \rho_{10} & (1-p_t)^n \rho_{11} \end{pmatrix}}} \quad (13)$$

$$= \sqrt{a^4 + a^2 \cdot b^2 \left( 2(1-p_t)^{n/2} + (1 - (1-p_t)^n) \right) + (1-p_t)^n \cdot b^4}.$$

令  $a^2 = x$ ,  $b^2 = y$ ,  $(1-p_t)^{n/2} = \lambda_B$ , 则有

$$F = \sqrt{x[\lambda_B((2-3\lambda_B) + 2(\lambda_B-1)x) + 1] + \lambda_B^2}. \quad (14)$$

SDQC 系统在自由空间通信中受不同程度环境干扰下, 量子态的跃迁概率  $p_t$  不同; 取  $n=1$ , 在不同量子态跃迁概率下, 保真度与参数  $x$  的关系如图 3 所示.

在自发幅度衰变信道下, 量子保真度  $F$  随着量

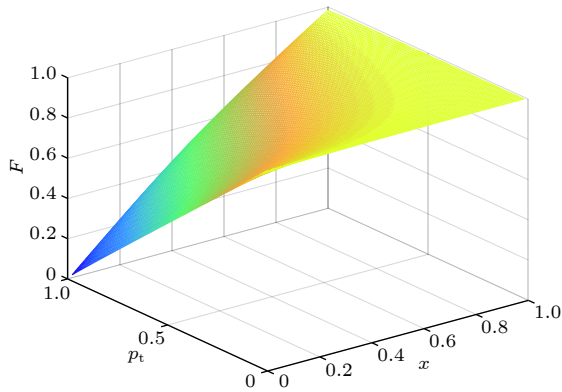


图 3 自发幅度衰变信道下量子保真度与量子态跃迁概率  $p_t$  及参数  $x$  的关系

Fig. 3. The relationship between quantum fidelity, quantum transition probability  $p_t$  and parameter  $x$  of SDQC in spontaneous amplitude decay channel.

子态跃迁概率  $p_t$  的增大而减小. 在量子态跃迁概率一定的情况下, 参数  $x$  的取值越大, 保真度越大. 当量子态跃迁概率  $p_t = 0.5$  时, 随着参数  $x$  的取值由 0.1 增大到 0.9, 保真度  $F$  由 0.7663 增大到 0.9936.

### 3.4 SDQC 系统在相位阻尼信道下的参数分析

量子态在噪声信道中传输时, 也会出现量子位之间没有发生能态的跃迁, 但相对相位发生了改变的情况, 称为相位阻尼信道.

设在相位阻尼信道中初始量子态  $C$  为  $|\varphi\rangle_C = a|0\rangle_C + b|1\rangle_C$ . 设量子位与背景环境干扰等效量子态发生完全弹性散射的概率为  $p_c$ , 初始量子态  $C$  在经过相位阻尼信道后演化为

$$|e\rangle (\alpha|0\rangle_C + \beta|1\rangle_C) \rightarrow [\sqrt{1-p_c}(\alpha|0\rangle_C + \beta|1\rangle_C) |e\rangle \mathbf{I}] + [\sqrt{p_c}(\alpha|0\rangle_C |e\rangle \mathbf{X} + \beta|1\rangle_C |e\rangle \mathbf{Y})]. \quad (15)$$

初始量子态密度矩阵经过相位阻尼信道后, 演化为

$$\varepsilon(\rho_C) = \begin{pmatrix} \rho_{00} & (1-p_c)^n \rho_{01} \\ (1-p_c)^n \rho_{10} & \rho_{11} \end{pmatrix}. \quad (16)$$

则对于相位阻尼信道, 其保真度可表示为

$$F = \text{tr} \sqrt{\sqrt{\begin{pmatrix} \rho_{00} & (1-p_c)^n \rho_{01} \\ (1-p_c)^n \rho_{10} & \rho_{11} \end{pmatrix}} \begin{pmatrix} \rho_{00} & \rho_{01} \\ \rho_{10} & \rho_{11} \end{pmatrix} \sqrt{\begin{pmatrix} \rho_{00} & (1-p_c)^n \rho_{01} \\ (1-p_c)^n \rho_{10} & \rho_{11} \end{pmatrix}}} \quad (17)$$

$$= \sqrt{a^4 + 2(1-p_c)^n a^2 b^2 + b^4}.$$

同上, 令  $a^2 = x, b^2 = y$ , 且  $\lambda_C = (1 - p_c)^n$ , 则量子保真度可表示为

$$F = \sqrt{1 + 2x(1-x)(\lambda_C - 1)}. \quad (18)$$

SDQC 系统在自由空间通信中受不同程度环境干扰下, 量子位与背景环境干扰等效量子态发生完全弹性散射的概率  $p_c$  不同; 取  $n = 1$ , 在不同概率下, 保真度与参数  $x$  的关系如图 4 所示.

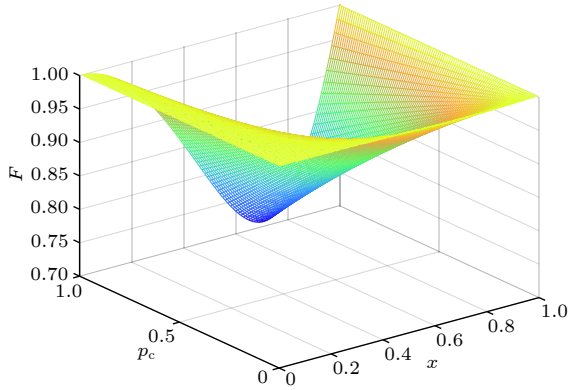


图 4 SDQC 在相位阻尼信道下量子保真度与量子位与背景环境干扰等效量子态发生完全弹性散射的概率  $p_c$  及参数  $x$  的关系

Fig. 4. Relationship between quantum fidelity, the probability of a qubit having complete elastic scattering with the background  $p_c$  and parameter  $x$  of SDQC in phase-damped channel.

在相位阻尼信道下, 量子保真度  $F$  随着量子位与背景环境干扰等效量子态发生完全弹性散射的概率  $p_c$  的增大而减小. 为保证最大保真度, 在量子位与背景环境干扰等效量子态发生完全弹性散射的概率一定时, 对所有概率而言, 参数  $x$  的取值满足  $\left|\frac{1}{2} - x\right|$  越大, 量子保真度越高. 当  $p_c = 0.5$  时, 随着  $x$  的取值从 0.5 减小到 0.1, 保真度  $F$  从 0.866 增加到 0.9539; 随着  $x$  的取值从 0.5 增加到 0.9, 保真度  $F$  从 0.9539 减小到 0.866.

#### 4 SDQC 系统性能参数的仿真与分析

在自由空间量子通信中, 量子信号通常会同时受到退极化、自发幅度衰变和相位阻尼三种因素的影响. 这三种噪声信道共同作用, 影响量子的保真度、纠缠度及量子误码率等量子通信性能指标.

在 SDQC 系统中, 定义  $\sigma$  为退极化信道影响因子,  $\omega$  为自发幅度衰变信道影响因子,  $\zeta$  为相位阻尼信道影响因子,

$$\sigma + \omega + \zeta = 1. \quad (19)$$

令在退极化信道下量子保真度为  $F_\sigma$ , 在自发幅度衰变信道下量子保真度为  $F_\omega$ , 在相位阻尼信道下量子保真度为  $F_\zeta$ . 三者共同作用, SDQC 系统量子保真度  $F$  可表示为

$$F = \sigma F_\sigma + \omega F_\omega + \zeta F_\zeta. \quad (20)$$

代入 (14), (19) 和 (20) 式

$$F = \sigma \lambda_A + (\omega^2 x [\lambda_B ((2 - 3\lambda_B) + 2(\lambda_B - 1)x) + 1] + \omega^2 \lambda_B^2)^{\frac{1}{2}} + (\zeta^2 (1 + 2x(1-x)(\lambda_C - 1)))^{\frac{1}{2}}. \quad (21)$$

由于环境的干扰是一个动态的因素, 不同类型的干扰 (如雾霾、沙尘、降雨等) 及干扰程度的不同都会对自由空间量子通信产生不同程度的影响, 其量子位出错概率  $p_d$ 、量子态跃迁概率  $p_t$  及量子位与背景环境干扰等效量子态发生完全弹性散射的概率  $p_c$  都会动态变化.  $p_d, p_t, p_c$  的数值的变化会对量子保真度、纠缠度造成不同程度的影响, 从而 SDQC 系统中参数的最优取值也不同.

若在某自由空间量子信道中,  $\sigma = \omega = \zeta$ , 我们对  $p_d, p_t, p_c$  的数值的变化对量子保真度的影响进行分析. 令  $n = 5$ , 分别取  $p_t = 0.1, p_c = 0.1; p_d = 0.1, p_c = 0.1; p_d = 0.1, p_t = 0.1$ , 讨论  $p_d, p_t, p_c$  随  $x$  取值变化对量子保真度  $F$  的影响, 如图 5—图 7 所示.

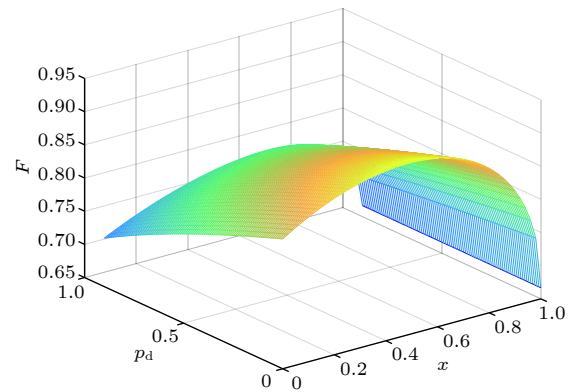


图 5 量子位出错概率  $p_d$  随  $x$  取值变化对量子保真度  $F$  的影响

Fig. 5. Influence of the change of qubit error probability  $p_d$  with the value of  $x$  on the quantum fidelity.

以上分析表明, 在自由空间量子通信中, 量子位出错概率  $p_d$ 、量子态跃迁概率  $p_t$  及量子位与背景环境干扰等效量子态发生完全弹性散射的概率  $p_c$  对量子保真度的影响程度不一, 且随着 SDQC 系

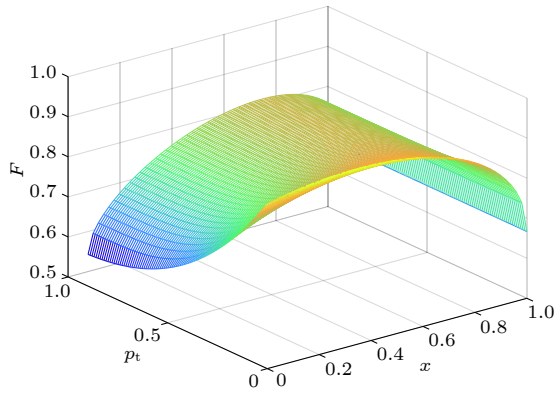


图 6 量子态跃迁概率  $p_t$  随  $x$  取值变化对量子保真度  $F$  的影响

Fig. 6. Influence of the change of quantum transition probability  $p_t$  with the value of  $x$  on the quantum fidelity.

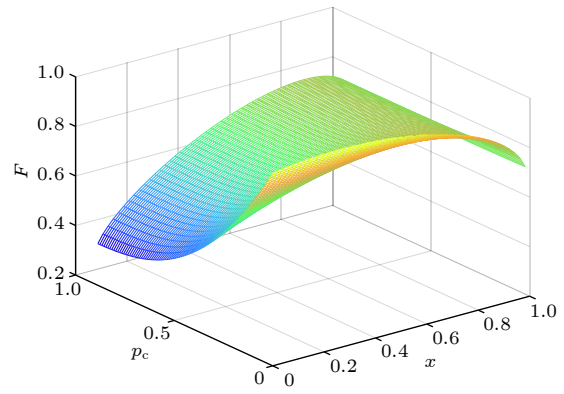


图 7  $p_c$  随  $x$  取值变化对量子保真度  $F$  的影响

Fig. 7. Influence of the change of the probability of a qubit having complete elastic scattering with the background  $p_c$  with the value of  $x$  on the quantum fidelity.

统中参数  $x$  的变化而变化. 为了保证保真度最大, 参数  $x$  的取值也应随不同因素环境干扰程度的变化而变化.

量子态在信道中存在的时间也会对保真度产生影响, 同时也影响系统参数的取值. 不同环境干扰因素下, SDQC 系统中量子保真度  $F$  与参数  $x$  及量子态存在时间  $n\Delta t$  关系如图 8 所示.

在不同环境干扰因素下, 为保证最大量子保真

度  $F$ , 参数  $x$  的最优取值也不同, 保真度随量子态作为信道时间的增长而降低. 随着时间的演化, 在同等干扰情况下,  $n$  的增大也会影响参数  $x$  的最优取值. 我们给出了部分不同环境干扰下, 参数  $x$  的最优取值, 列于表 1.

SDQC 系统还可以根据不同的业务需求, 合理的调整参数. 若在一次通信过程中, 有  $p_d = 0.1$ ,  $p_t = 0.1$ ,  $p_c = 0.1$ , 我们规定本次通信保真度不应

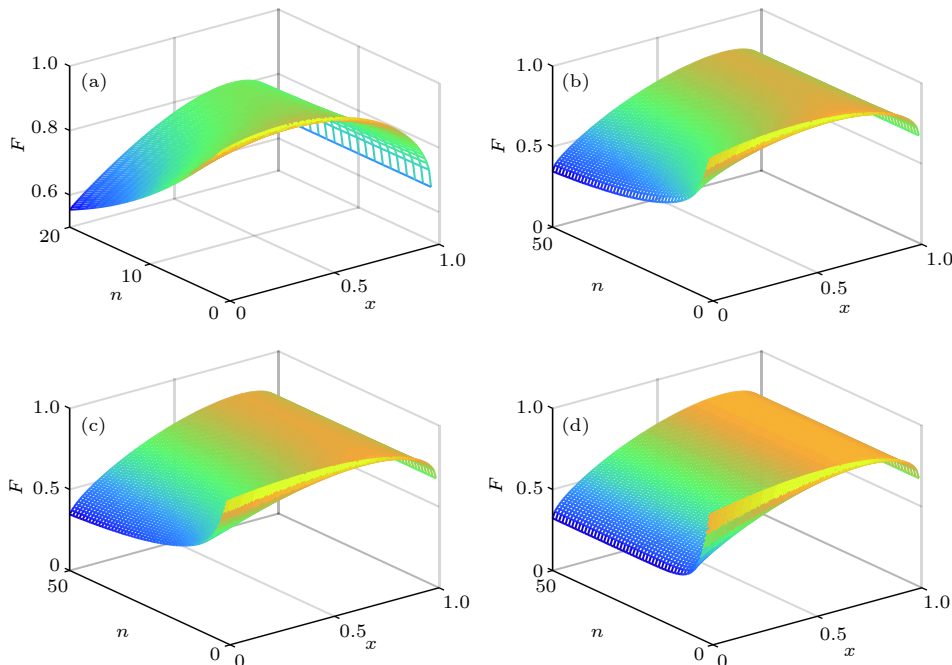


图 8 SDQC 系统在不同环境干扰因素下保真度  $F$  与参数  $x$  的取值关系随时间的演化 (a)  $p_d = 0.1$ ,  $p_t = 0.1$ ,  $p_c = 0.1$ ; (b)  $p_d = 0.1$ ,  $p_t = 0.5$ ,  $p_c = 0.1$ ; (c)  $p_d = 0.1$ ,  $p_t = 0.1$ ,  $p_c = 0.5$ ; (d)  $p_d = 0.1$ ,  $p_t = 0.5$ ,  $p_c = 0.5$

Fig. 8. Analysis on the evolution of the relationship between fidelity  $F$  and  $x$  of SDQC system under different environmental disturbance factors over time: (a)  $p_d = 0.1$ ,  $p_t = 0.1$ ,  $p_c = 0.1$ ; (b)  $p_d = 0.1$ ,  $p_t = 0.5$ ,  $p_c = 0.1$ ; (c)  $p_d = 0.1$ ,  $p_t = 0.1$ ,  $p_c = 0.5$ ; (d)  $p_d = 0.1$ ,  $p_t = 0.5$ ,  $p_c = 0.5$ .

低于 0.85, SDQC 系统参数的集合如图 9 所示.

通过调整  $x$  的取值, 在满足规定条件的情况下可以适当增加单量子态作为信道的的时间, 减少使用量子态的数目, 节省信道资源, 使系统更加灵活. 可以通过修改软件程序, 对系统参数进行自适应调整, 以适应不同的业务需求.

表 1 不同环境干扰因素下 SDQC 系统参数  $x$  的最优取值表

Table 1. The optimal value of parameter  $x$  in SDQC system under different environmental disturbance factors.

$p_d$	$p_t$	$p_c$	$n/\Delta t$	$x$	$n/\Delta t$	$x$	$n/\Delta t$	$x$
0.1	0.1	0.1	1	0.29	5	0.49	10	0.66
0.1	0.5	0.1	1	0.43	5	0.66	10	0.74
0.1	0.1	0.5	1	0.42	5	0.73	10	0.78
0.1	0.5	0.5	1	0.56	5	0.80	10	0.81

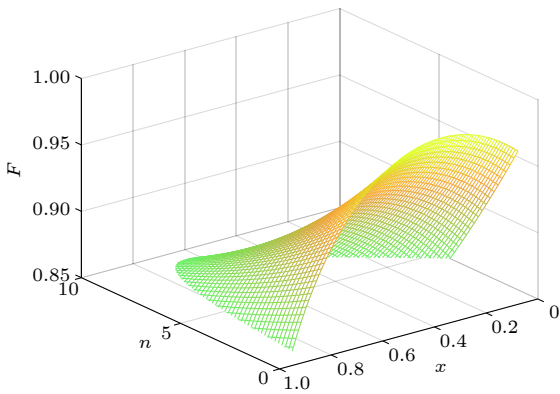


图 9 保真度大于 0.85 时参数  $x$  及  $n$  的集合

Fig. 9. The set of parameters  $x$  and  $n$  when the fidelity is greater than 0.85.

## 5 基于 SDQC 的自由空间量子通信信道参数自适应调整策略的应用分析

基于软件定义量子通信的自由空间量子通信信道参数自适应调整策略可应用于各类初态可变的量子通信协议. 如经典的 B92 协议 [22] 及 QPQ (quantum private query) 协议 [23] 等. 在 B92 协议, 即二态协议中, 通过实时调整参数  $x$ , 改变发送端 Alice 第二种量子态  $|\phi\rangle$  的初始状态, 以适应环境的变化, 并在接收端 Bob 选取与初始状态相应的测量基, 最终在保证保真度的情况下完成通信.

北京邮电大学 Gao 教授团队 [24] 提出了一种灵

活的基于量子密钥分发的量子私人查询协议, 该协议通过调整参数  $\theta$ , Alice 得到的密钥位平均数量可被设定为用户需要的确定值, 亦可通过降低  $\theta$  提高数据安全性, 提高  $\theta$  使得 Bob 能够正确猜测 Alice 查询地址的概率较低. 在该方案中, 初始量子态集为  $\{|0\rangle, |1\rangle, |0'\rangle, |1'\rangle\}$ , 其中

$$|0'\rangle = \cos \theta |0\rangle + \sin \theta |1\rangle, |1'\rangle = \sin \theta |0\rangle - \cos \theta |1\rangle, \quad (22)$$

$|0\rangle, |1\rangle$  代表量子比特 0,  $|0'\rangle, |1'\rangle$  代表量子比特 1,  $\theta \in (0, \pi/2)$ . 在 SDQC 系统中, 量子态  $|0\rangle$  的密度矩阵为

$$\rho_{|0\rangle} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (23)$$

根据 (22) 式, 对于量子态  $|0'\rangle$ , 有参数  $x = \cos^2 \theta$ ; 对于量子态  $|1'\rangle$ , 参数  $x = \sin^2 \theta$ . 在该协议下, Bob 在制备量子态时, 可将保真度作为一个影响因素, 与量子密钥位平均数量、数据安全性、Bob 获得 Alice 查询地址概率等综合考虑, 合理地选择参数  $\theta$  的数值.

## 6 结 论

在自然环境背景干扰下, 根据自由空间量子通信受退极化、自发幅度衰变和相位阻尼三种因素的影响程度不同, SDQC 系统参数的最佳取值也不同. 量子保真度随着时间的演化而降低, 单量子态作为信道的的时间越短, 保真度越高; 随着时间的演化, 为保证量子保真度处于最大值, 初始量子状态也随之变化, 即参数  $x$  的取值. 在基于 SDQC 系统下的自由空间量子通信信道参数自适应调整策略中, 接入层获取底层的基础状态信息并上传给控制层, 控制层对整个网络的拓扑和状态信息进行实时监测, 根据环境因素的变化和管理层预置的程序, 自适应地调整优化量子态的初始状态及单量子态作为信道的的时间, 保证在通信过程中系统能够始终保持量子保真度与纠缠度处于最大值, 从而提升自由空间量子通信的抗干扰能力, 有效提高了量子通信系统的生存性及综合免疫力. 此外, SDQC 系统也具有适应性强、应用范围广的特点, 它可以根据不同的情况, 灵活地修改系统参数, 满足各种业务需求.



## 参考文献

- [1] Jin X M, Ren J G, Yang B 2010 *Nat. Photon.* **4** 376
- [2] Ma X S, Thomas H, Thomas S, Wang D Q, Sebastian K, William N, Bernhard W, Alexandra M, Johannes K, Elena A, Vadim M, Thomas J, Rupert U, Anton Z 2012 *Nature* **489** 269
- [3] Davide E B, Timothy C, Ralph, Ivette F, Thomas J, Mohsen R 2014 *Phys. Rev. D* **90** 045041
- [4] Nie M, Ren J, Yang G, Zhang M L, Pei C X 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 150301 (in Chinese) [聂敏, 任杰, 杨光, 张美玲, 裴昌幸 2015 物理学报 **64** 150301]
- [5] Nie M, Shang P G, Zhang M L, Pei C X 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 240303 (in Chinese) [聂敏, 尚鹏钢, 杨光, 张美玲, 裴昌幸 2014 物理学报 **63** 240303]
- [6] Nie M, Shi L, Yang G, Pei C X 2017 *J. Commun.* **38** 2017092 (in Chinese) [聂敏, 石力, 杨光, 裴昌幸 2017 通信学报 **38** 2017092]
- [7] Ivan C, Andrea T, Alberto D, Francesca G, Ruper U, Giuseppe V, Paolo V 2012 *Phys. Rev. Lett.* **109** 200502
- [8] Nie M, Ren J M, Yang G, Zhang M L, Pei C X 2016 *Acta Photon. Sin.* **45** 0927004 (in Chinese) [聂敏, 任家明, 杨光, 张美玲, 裴昌幸 2016 光子学报 **45** 0927004]
- [9] Nie M, Tang S R, Yang G, Zhang M L, Pei C X 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 070302 (in Chinese) [聂敏, 唐守荣, 杨光, 张美玲, 裴昌幸 2017 物理学报 **66** 070302]
- [10] Nie M, Chang L, Yang G, Zhang M L, Pei C X 2017 *Acta Photon. Sin.* **46** 0701002 (in Chinese) [聂敏, 常乐, 杨光, 张美玲, 裴昌幸 2017 光子学报 **46** 0701002]
- [11] Nie M, Tang S R, Yang G, Zhang M L, Pei C X 2017 *Acta Photon. Sin.* **46** 1206002 (in Chinese) [聂敏, 唐守荣, 杨光, 张美玲, 裴昌幸 2017 光子学报 **46** 1206002]
- [12] Nie M, Ren J M, Yang G, Zhang M L, Pei C X 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 190301 (in Chinese) [聂敏, 任家明, 杨光, 张美玲, 裴昌幸 2016 物理学报 **65** 190301]
- [13] Zhang C K, Cui Y, Tang H Y, Wu J P 2015 *J. Software* **26** 62 (in Chinese) [张朝昆, 崔勇, 唐嵩祎, 吴建平 2015 软件学报 **26** 62]
- [14] Mijumbi R, Serrat J, Gorricho J, Bouten N, de Truck F, Boutaba R 2016 *IEEE Commun. Surv. Tut.* **18** 239
- [15] Suresh L, Schulz J, Merz R, Feldmann A 2012 *Comput. Commun. Rev.* **42** 279
- [16] Kamran K, Banerjee S 2012 *Proceedings of the 8th International Conference on Network and Service Management* Las Vegas, USA, October 22–26, 2012 p295
- [17] Jin D, Nicol D M 2013 *Proceedings of the 2013 ACM SIGSIM Conference On Principles of Advanced Discrete Simulation* Montreal, Canada, May 19–22, 2013 p91
- [18] Yin H, Ma H X 2006 *Introduction to Quantum Communication in Military* (Beijing: Military Science Press) p224 (in Chinese) [尹浩, 马怀新 2006 军使量子通信概论 (北京: 军事科学出版社) 第224页]
- [19] Zhang D Y 2013 *Quantum Logic Gates and Quantum Decoherence* (Beijing: Science Press) pp90–110 (in Chinese) [张登玉 2013 量子逻辑门与量子退相干 (北京: 科学出版社) 第90–110页]
- [20] Liao X P, Fang M F, Fang J S, Zhu Q Q 2014 *Chin. Phys. B* **23** 020304
- [21] Yin H, Ma H X 2006 *Introduction to Quantum Communication in Military* (Beijing: Military Science Press) p227 (in Chinese) [尹浩, 马怀新 2006 军使量子通信概论 (北京: 军事科学出版社) 第227页]
- [22] Bennett C H 1992 *Phys. Rev. Lett.* **68** 3121
- [23] Gao F, Qin S J, Huang W, Wen Q Y 2019 *Sci. China: Phys. Mech. Astron.* **62** 070301
- [24] Gao F, Liu B, Wen Q Y 2012 *Opt. Express* **20** 17411

# Parameters adaptive adjustment strategy of quantum communication channel in free-space based on software-defined quantum communication\*

Wei Rong-Yu<sup>1)†</sup> Nie Min<sup>1)</sup> Yang Guang<sup>1)2)</sup> Zhang Mei-Ling<sup>1)</sup>  
Sun Ai-Jing<sup>1)</sup> Pei Chang-Xing<sup>3)</sup>

1) (School of Communication and Information Engineering, Xi'an University of Post and Telecommunications, Xi'an 710121, China)

2) (School of Electronics and Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

3) (State Key Laboratory of Integrated Service Networks, Xidian University, Xi'an 710071, China)

( Received 31 March 2019; revised manuscript received 26 April 2019 )

## Abstract

Quantum communication in free space will be disturbed by natural environment, such as fog, dust, and rain, which is a difficult problem in the construction of quantum communication system. In order to solve this problem and improve the survivability of quantum communication system, we propose an adaptive parameter adjustment strategy for free-space quantum communication based on software-defined quantum communication (SDQC). Firstly, we propose a software-defined quantum communication model based on the idea of software defined networks. The architecture of SDQC is divided into four layers: transport layer, access layer, control layer, and management layer. The SDQC system sends the link information to the preset program at a management level through the real-time monitoring of channel state by the access layer. According to the link information, the management level issues instructions to the control layer to adjust the parameters such as the initial quantum state and the existence time of single quantum state, in order to improve the quantum entanglement and fidelity. Secondly, we analyze the relationship between quantum fidelity and parameters in SDQC system under three noise channels, i.e. depolarization channel, spontaneous amplitude decay channel, and phase damping channel. In the depolarized channel, the quantum fidelity  $F$  decreases with the increase of the error probability  $P_d$  of the qubit. When the error probability of qubit is certain, the system has the maximum quantum fidelity with the value of parameter  $x$  is 0.5. In the spontaneous amplitude decay channel, the quantum fidelity  $F$  decreases with the increase of the quantum state transition probability  $p_t$ . When the transition probability of quantum state is certain, the higher the value of parameter  $x$ , the higher the fidelity will be. In the phase-damped channel, the quantum fidelity  $F$  decreases with the increase of the probability  $p_c$  with which the qubit and the background interference equivalent quantum state have complete elastic scattering. When the probability is certain, the larger the value of  $|1/2 - x|$ , the higher the quantum fidelity of the system will be. Finally, we study the optimal values of SDQC system parameters under different environmental disturbances. The simulation results show that the optimal parameters of SDQC system are different when the parameters of three noise channels, namely depolarization, spontaneous amplitude decay and phase damping, are different. The system adaptively selects the initial quantum state and the existence time of single quantum state according to the environmental change and business demand, so that the quantum fidelity is always at the peak in the communication process. This strategy effectively improves the adaptability and comprehensive immunity of the quantum communication system.

**Keywords:** free space quantum communication, software defined quantum communication, quantum state, fidelity

**PACS:** 03.67.Hk, 03.67.-a

**DOI:** 10.7498/aps.68.20190462

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61172071), the International Scientific and Technological Cooperation and Exchange Program in Shaanxi Province, China (Grant No. 2015KW-013), and the Scientific Research Program Funded by Shaanxi Provincial Education Department, China (Grant No. 16JK1711).

† Corresponding author. E-mail: 353504371@qq.com