

基于袋鼠纠缠跳跃模型的量子状态自适应跳变通信策略

聂敏 卫容宇 杨光 张美玲 孙爱晶 裴昌幸

An adaptive quantum state-hopping communication strategy based on kangaroo entanglement hopping model

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

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 68, 110301 (2019) DOI: 10.7498/aps.68.20190163

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190163>

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>

基于袋鼠纠缠跳跃模型的量子状态自适应 跳变通信策略*

聂敏¹⁾ 卫容宇^{1)†} 杨光¹⁾²⁾ 张美玲¹⁾ 孙爱晶¹⁾ 裴昌幸³⁾

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1月28日收到; 2019年3月22日收到修改稿)

自由空间中的量子通信会不同程度上受到雾霾、沙尘等自然环境的干扰. 为了研究提升此类干扰下量子通信的性能, 本文分析了背景干扰下单量子态信道随时间演化的性能变化, 并根据袋鼠纠缠跳跃模型 (KEHM), 提出了基于 KEHM 的量子状态自适应跳变通信策略, 对其性能参数进行仿真. 仿真结果表明, 采取量子状态跳变, 在背景量子噪声的平均功率与量子信号平均功率的比值为 5 的情况下, 量子误比特率随着量子态跳频率从 1 增大到 15, 由 0.4524 降低到 0.1116; 当单量子态传输成功率 0.95, 量子比特率大于 200 qubit/s 时, 不同态跳频率下量子比特的成功传输概率均大于 0.97. 当发送端信号源平均量子数足够大且接收端接收效率趋近于 1 时, 量子态的通过率也趋近于 1; 采取量子态跳自适应控制策略, 能够进一步降低系统的误码率.

关键词: 自由空间量子通信, 背景量子噪声, 量子状态跳变, 误比特率

PACS: 03.67.Hk, 03.67.-a

DOI: 10.7498/aps.68.20190163

1 引言

近年来, 国内外关于自由空间量子通信的研究取得了巨大的成就. 2010 年, Jin 等^[1] 实现了 16 km 自由空间量子隐形传态. 2009 年, 奥地利科学院与维也纳大学通过实验演示了纠缠光子在 144 km 自由空间链路上的成功传输^[2]. 2012 年, Ma 等^[3] 进行了超过 143 km 的自由空间量子隐形传态实验并取得成功. Wang 等^[4] 也于 2013 年完成了百公里级星地量子衰减信道的自由空间量子通信实验, 2015 年成功实现了多自由度的量子隐形传态^[5]. 2016 年, “墨子号”量子卫星成功发射, 为全球量子通信网络的构建提供了理论和实验基础^[6]. 在此基

础上, 我国科学团队计划与欧洲量子通信团队合作, 发射多颗量子通信卫星建成全球化的广域量子通信网络.

量子信息在自由空间传输时, 量子态的纠缠度、相位、保真度、偏振、极化以及量子信道的各种参数不可避免地会受到自然环境干扰的影响. 因此, 目前“墨子号”量子卫星通信实验仅能在夜间进行. 但要建设全球量子卫星广域通信网, 就必须解决量子卫星星地间的 24 h 全天候通信这一难题. 2017 年, 潘建伟团队^[7] 首次克服了太阳光带来的噪声, 实现了白天 53 km 以上的自由空间量子密钥分发. 文献^[8] 研究了中尺度沙尘暴对量子卫星通信的影响. 文献^[9] 分析了 PM2.5 大气污染对自由空间量子通信性能的影响. 文献^[10] 研究了大气

* 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 (批准号: 2015KW-013) 和陕西省教育厅科研计划 (批准号: 16JK1711) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: 353504371@qq.com

湍流对远距离量子通信的影响. 文献 [11] 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 [12] 研究了冰水混合云与量子信道衰减的关系. 文献 [13] 研究了中纬度地区电离层偶发 E 层对量子卫星通信性能的影响. 文献 [14] 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 [15] 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. 文献 [16] 研究了雷暴雨对星地量子链路性能的影响.

以上研究都只对环境干扰下对量子通信性能的影响进行了分析, 并未提出相应的方案来解决量子通信在受雾霾、沙尘暴等自然环境干扰下的生存性问题. 目前国内外关于此类方案的研究尚未展开, 但对这些问题的研究, 决定了自由空间量子通信系统的生存性和能否可持续发展的问题, 具有十分重要的意义. 因此, 本文为解决广域量子卫星通信网中自由空间下全天候通信这一问题, 提出了基于袋鼠纠缠跳跃模型 (kangaroo entanglement hopping model, KEHM) 的量子状态自适应跳变通信策略. 该通信策略能够有效提升自由空间量子通信在自然环境背景干扰下的抗干扰能力, 增强量子通信系统的综合免疫力, 为广域量子卫星通信网的可靠性与生存性问题提供理论依据, 为自由空间量子通信的健康发展奠定理论基础.

2 环境干扰下单量子态信道随时间演化分析

根据文献 [17], 量子纠缠度可表示为

$$E = S(\rho_A) = S(\rho_B) = -\text{Tr}(\rho_A \log_2 \rho_A), \quad (1)$$

其中量子信道为子系统 A; 雾霾、沙尘等自然环境背景量子噪声为子系统 B. 二者相互作用, 约化密度矩阵为 [18]

$$\rho_A = \text{Tr}_B(\rho_{AB}). \quad (2)$$

假设选用量子态 $|\varphi\rangle_1$ 作为量子信道进行通信, $|\varepsilon\rangle_0$ 为自然环境背景量子噪声初始状态, 则随着时间的演化, 自然环境背景量子噪声与量子信道相互作用可表示为

$$\begin{aligned} |\psi\rangle_1 &= \int_0^\tau \sum_i \sqrt{p_i} |h\rangle |\varepsilon\rangle_0 d\tau \\ &= \sum_i \sqrt{p_i} |h\rangle |\varepsilon\rangle_s, \end{aligned} \quad (3)$$

其中 $|h\rangle$ 是 Hilbert 空间中的完备基; $\sqrt{p_i}$ 是约化密度矩阵的非零本征值; $|\varepsilon\rangle_s$ 是量子态 $|\varphi\rangle_1$ 与自然环境背景量子噪声 $|\varepsilon\rangle_0$ 作用的终态; τ 为量子态持续时间. 在该信道下, 量子信息传输会受到严重影响.

设 p_t 为量子退极化率, 在自然环境背景噪声干扰下, 量子态密度矩阵随时间最终演变为

$$\rho = \begin{pmatrix} \left(1 - \frac{2}{3}p_t\right)\rho_{00} + \frac{2}{3}p_t\rho_{11} & \left(1 - \frac{4}{3}p_t\right)\rho_{01} \\ \left(1 - \frac{4}{3}p_t\right)\rho_{10} & \left(1 - \frac{2}{3}p_t\right)\rho_{00} + \frac{2}{3}p_t\rho_{11} \end{pmatrix}. \quad (4)$$

自然环境背景噪声干扰下自由空间量子信号的传输能量衰减可表示为 [19]:

$$E_s = E_1 e^{-\delta_n v_q \tau}, \quad (5)$$

其中 E_s 为量子态初态 $|\varphi\rangle_1$ 与背景量子噪声 $|\varepsilon\rangle_0$ 在传播一定距离后最终形成的量子态 $|\varphi\rangle'_1$ 的能量; E_1 为量子态 $|\varphi\rangle_1$ 的初始能量; δ_n 为量子背景噪声影响因子; v_q 为光子传播速度. 根据文献 [9], 令

$$\chi(\tau) = \frac{E_s}{E_1} = e^{-\delta_n v_q \tau}, \quad (6)$$

则受自然环境背景干扰时, 光子丢失概率为

$$\varsigma = \frac{2 \frac{H_2(\chi(\tau))}{1-\chi(\tau)} (1-\chi(\tau)) - \chi(\tau)}{\left(1 + 2 \frac{H_2(\chi(\tau))}{1-\chi(\tau)}\right) (1-\chi(\tau))}. \quad (7)$$

量子通信幅值阻尼信道的信道容量为

$$\begin{aligned} C_s &= (1-\varsigma) \chi(\tau) \log(1-\varsigma) \chi(\tau) - (1-\varsigma) \\ &\quad \times H_2[1-\chi(\tau)] - [\varsigma + (1-\varsigma)(1-\chi(\tau))] \\ &\quad \times \log[\varsigma + (1-\varsigma)(1-\chi(\tau))], \end{aligned} \quad (8)$$

其中 $H_2(\chi)$ 为二元香浓熵. 设接收方探测器探测效率为 η_{det} , 不受干扰条件下计数率为 ℓ , 量子误码率可表示为

$$R_\varphi = \frac{\ell + (1-\chi(\tau))}{\eta_{\text{det}}(\ell + \chi(\tau)(1-\ell))}. \quad (9)$$

通过以上分析得出, 在受自然环境干扰的自由空间量子通信中, 采取单一的量子态作为量子信道, 由于初始量子态 $|\varphi\rangle_1$ 与背景量子噪声 $|\varepsilon\rangle_0$ 的相互作用, 通信的各性能指标都会在时间的演化下都会受到更大程度的影响.

3 基于 KEHM 的量子状态跳变通信策略

袋鼠是生活在澳大利亚等国的群居动物, 当受

到惊吓时,就会集体不约而同地远距离跳跃.多只袋鼠按照相同的模式同步跳跃,其跳跃步长、高度、频率、轨迹等参数相同.

为了增强雾霾和沙尘暴背景下自由空间量子通信系统的生存性,我们提出基于 KEHM 的量子状态跳变通信策略,其核心内容是袋鼠纠缠跳跃模型.用 KEHM 控制量子纠缠态,使得收发端的量子态按照相同的序列跳变.KEHM 的内容具体如下:

1) 多只袋鼠在跳跃时,起跳时间、跳跃步长、跳跃频率、跳跃高度和跳跃轨迹均相同,我们将多只袋鼠相同参数的跳跃模式,称为袋鼠纠缠跳跃;

2) 设在 t_i 时刻,甲地袋鼠 Alice (以下简称 K_A) 和乙地袋鼠 Bob (以下简称 K_B) 开始纠缠跳跃,如图 1 和图 2 所示,在 $0-T_1$ 时刻, K_A 和 K_B 均处于状态 $|\phi\rangle_n$; 在 T_1-T_2 时刻, K_A 和 K_B 均处于状态 $|\phi\rangle_{n-2}$; 在 T_2-T_3 时刻, K_A 和 K_B 都处于状态 $|\phi\rangle_{n-1}$; 不同时刻袋鼠的跳跃状态如表 1 所示, K_A 和 K_B 起跳时间相同,跳跃频率相同;

3) 规定量子通信双方都拥有量子态集 $\{|\phi\rangle_1,$

$|\phi\rangle_2, |\phi\rangle_3, \dots, |\phi\rangle_n\}$, 参照 K_A 与 K_B , 按事先约定好的模式实现同步量子状态跳变.不同时刻量子通信收发双方同步量子跳跃状态如表 1 所示.

表 1 不同时刻通信双方量子跳跃状态

Table 1. Quantum hopping states of communication parties at different moments.

时刻 T	状态 $ \phi\rangle$
$0-T_1$	$ \phi\rangle_n$
T_1-T_2	$ \phi\rangle_{n-2}$
T_2-T_3	$ \phi\rangle_{n-1}$
T_3-T_4	$ \phi\rangle_1$
...	...
$T_{n-1}-T_n$	$ \phi\rangle_1$

4 基于 KEHM 的量子状态跳变通信策略性能分析

4.1 自然环境量子背景噪声下误比特率分析

在自由空间量子通信系统中,通过量子状态跳变,能够有效地防止沙尘、雾霾等自然环境干扰.设 E_s 为每比特信号能量, P_J 为自然背景量子噪声的平均功率,量子带宽为 W ,则量子背景干扰功率谱密度为 $N_0 = P_J/W$.宽带量子噪声对量子状态跳变通信的影响,等效为量子噪声 N_0 ,在 M 进制的量子通信系统中,对应的量子误比特率为

$$P_b = \frac{1}{2(M-1)} \exp\left[-\frac{lE_s}{2N_0}\right] \cdot \sum_{m=2}^M \binom{M}{m} (-1)^m \times \exp\left[-\frac{(m-2)lE_s}{m \cdot 2N_0}\right], \quad (10)$$

其中 $l = \log_2 M$. 在基于 KEHM 的量子状态跳变通信系统中,当 $M = 2$ 时,令 R 表示量子比特率, P_J 为量子信号平均功率; 设量子态跳最小频率间隔 $\Delta f_{\min} = R$, $K_{JS} = P_J/P_S$, 使量子态以频率 f 跳变,量子误比特率与量子态跳频率及 K_{JS} 的关系如图 3 所示

量子误比特率 P_b 随着背景量子噪声平均功率与量子信号平均功率的比值 K_{JS} 的增大而增大. 当 K_{JS} 确定时,量子误比特率随着量子态跳频率的增大而减小. $K_{JS} = 5$ 时,随着 f 从 1 增大到 15, P_b 从 0.4524 降低到 0.1116. 结果表明,该量子状态跳变通信策略能够通过改变量子态跳的频率从而有效降低量子系统的误比特率.

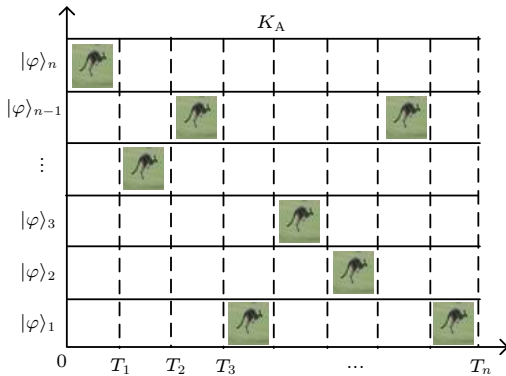


图 1 K_A 的跳跃模式
Fig. 1. Skip mode of K_A .

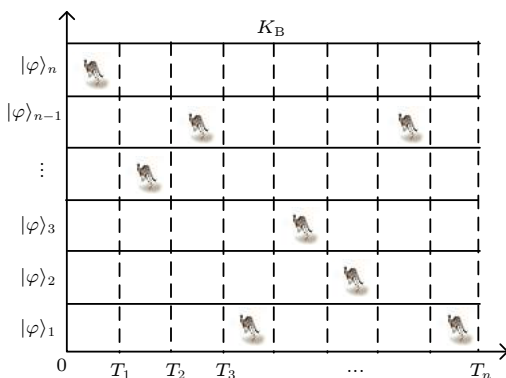


图 2 K_B 的跳跃模式
Fig. 2. Skip mode of K_B .

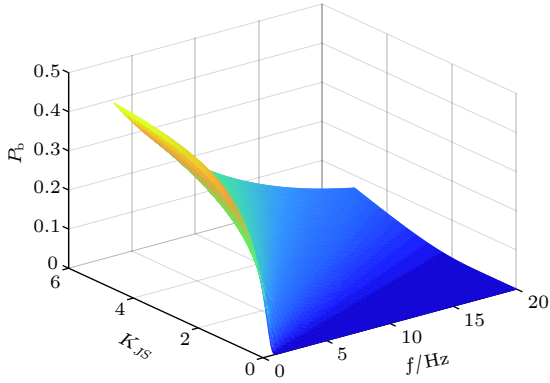

 图3 量子误比特率与量子态跳频率及 K_{JS} 的关系

Fig. 3. Relationship between quantum bit error rate, quantum state hopping frequency and K_{JS} .

4.2 量子态传输性能分析

在雾霾和沙尘等背景下, 基于 KEHM 的量子状态跳变通信过程, 是一种量子级联多态通信系统. 在量子态跳变的过程中, 若每一种量子态传输成功率为 p , 相应的量子误比特率为 P_b , 用 X_n 表示第 n 次状态跳变后的系统输出结果, 则 $\{X_n, n \geq 1\}$ 是以 $S = \{0, 1\}$ 为状态空间的齐次马尔可夫链, 其状态转移概率矩阵为

$$P = \begin{bmatrix} p & p_b \\ p_b & p \end{bmatrix}. \quad (11)$$

令

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & p - p_b \end{bmatrix}, \quad (12)$$

则每比特量子态的成功传输概率为

$$P_r = (H A H^{-1})^{\frac{f}{R}} = H A^{\frac{f}{R}} H^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} + \frac{1}{2}(p - p_b)^{\frac{f}{R}} & \frac{1}{2} - \frac{1}{2}(p - p_b)^{\frac{f}{R}} \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2}(p - p_b)^{\frac{f}{R}} & \frac{1}{2} + \frac{1}{2}(p - p_b)^{\frac{f}{R}} \end{bmatrix}, \quad (13)$$

其中 H 为 Hardward 算符. 取 $p = 0.95$, 背景量子噪声与量子信号平均功率比值为 1, 在不同量子状态跳变频率 f 下, 量子比特的成功传输概率与量子比特率的关系如图 4 所示.

由于量子态的持续时间越长, 其性能参数受环境影响越大, 量子比特的成功传输概率 P_r 随着量子比特率 R 的增大而增大. 对于同量子比特率, 量子状态跳变频率 f 越大, 量子比特传输成功率 P_r 越小, 但量子比特率越大, f 对传输成功率的影响越小. 如图 4 所示, 在 $f = 10$ Hz, $f = 50$ Hz, $f = 100$ Hz 的情况下, 当 $R = 200$ qubit/s 时, 均有 $P_r > 0.97$.

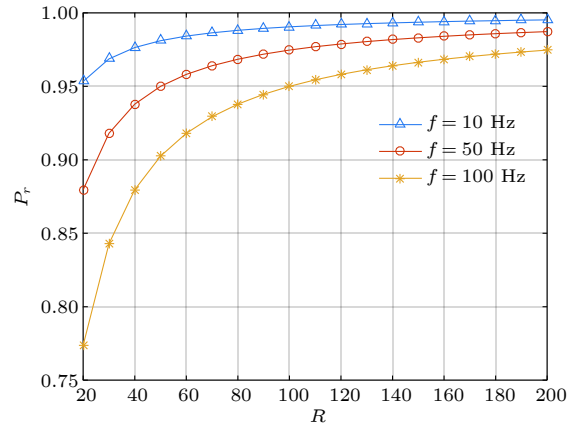


图4 量子比特成功传输概率与量子比特率的关系

Fig. 4. Relationship between the probability of successful quantum bit transmission and the quantum bit rate.

在雾霾和沙尘等自然环境背景下, 令 μ 为信号源平均量子数, 自由空间量子通信系统的量子数 κ 服从 Poisson 分布. 信号源发射的量子态可以表示为^[20]

$$\rho_S = \sum_{n=0}^{\infty} |n\rangle \langle n| P(n) = \sum_{\kappa=0}^{\infty} |n\rangle \langle n| e^{-\mu} \frac{\mu^\kappa}{\kappa!}. \quad (14)$$

在量子状态跳变系统中, 量子传输效率可等效为每比特量子态的成功传输概率. 设 η_B 为接收端的量子接收效率, 接收端的量子探测率为

$$P_B = 1 - \frac{e^{-\mu\eta_B} - \eta_B e^{-\mu}}{1 - \eta_B}. \quad (15)$$

则在雾霾沙尘等环境干扰下, 经过量子状态跳变后, 量子态的通过率可表示为

$$Q = \frac{1 - \frac{e^{-\mu\eta_B} - \eta_B e^{-\mu}}{1 - \eta_B}}{1 - e^{-\mu P_r}}. \quad (16)$$

当 $P_r = 0.95$ 时, 量子态通过率与接收端量子接收效率及信号源平均量子数的关系如图 5 所示.

量子态通过率 Q 与接收端量子接收效率 η_B 成正比, 且随着信号源平均量子数 μ 的增大, 接收端量子接收效率 η_B 对 Q 的影响越小. 当接收端量子接收效率 $\eta_B = 0.8$ 时, 随着信源平均量子数 μ 从 1 增加到 10, 量子态通过率 Q 由 0.3667 增大到 0.9986; 当信源平均量子数 $\mu = 6$ 时, 随着接收端量子接收效率 η_B 从 0.2 增加到 0.99, 量子态通过率 Q 由 0.6262 增大到 0.9855. 当 μ 足够大且 η_B 趋近于 1 时, 量子态的通过率也趋近于 1. 通过合理选择量子态数目, 能够有效提升量子状态跳变通信策略下系统的量子态通过率, 进一步增强系统的抗干扰能力.

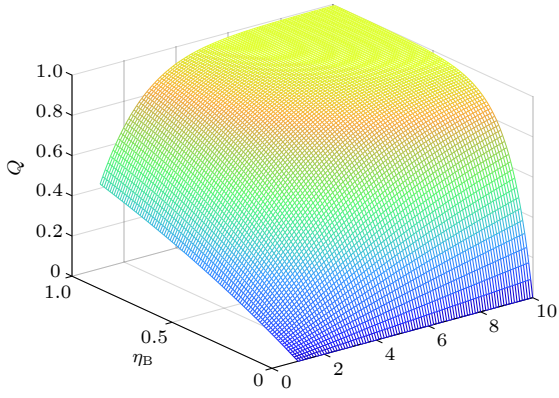


图 5 量子态通过率与接收端量子接收效率及信号源平均量子数的关系

Fig. 5. Relationship between the quantum state pass rate and the receiver's quantum reception efficiency and the average quantum number of the signal source.

5 基于 KEHM 的量子状态自适应跳变

5.1 量子状态跳变自适应控制策略

实时量子信道检测通过监测各个量子状态信道的各种参数从而确定该量子态信道的质量及信道接收功率的强弱,判断其是否受到干扰和能否进行正常的量子通信.本文提出基于实时量子信道状态检测的量子状态跳变自适应控制策略,其核心思想是实现从量子状态跳变的量子态集中去除被干扰严重的量子态,实现 Alice 和 Bob 间在低强度干扰的量子态上同步跳变.具体内容如下:

1) 将全部可用的量子态集 $\{|\varphi\rangle_1, |\varphi\rangle_2, |\varphi\rangle_3, \dots, |\varphi\rangle_q\}$ 组成为一个量子状态表,通过实时量子信道状态检测,评估各信道质量;

2) Bob 通过反馈评估信息告知 Alice 放弃之前传输所用被判定为受干扰严重的无效量子态的信道;

3) Bob 选择量子状态表中未被干扰且可使用的量子态作为代替,完成可用量子状态表的更新,并通知 Alice;

4) Alice 收到来自 Bob 的反馈和通知信息,与 Bob 一致完成量子状态表的更新,继续通信.

5.2 量子状态跳变自适应控制平均处理时间分析

在量子状态跳变自适应控制机制中,受干扰量子态的平均处理时间 T_j 可表示为

$$T_j = \frac{1}{q_j} \sum_{i=1}^{q_j} T_{ji}(q_j), \quad (17)$$

其中 q_j 为受干扰的量子态数目; $T_{ji}(q_j)$ 是关于 q_j 的函数. T_j 可分为 3 个部分: 受干扰量子态 $|\varphi\rangle_j$ 的检测与计算时间 T_a , $|\varphi\rangle_j$ 报告量子态参数的时间 T_b 与应答信息的传输时间 T_c , T_j 也可表示为 $T_a + T_b + T_c$. 设每个量子态出现的频率为 $1/q$, 所以每个量子态受干扰检测与计算的平均时间 T_a 近似为

$$T_a = q \cdot K_q \cdot (1/f), \quad (18)$$

其中 q 为量子态的数目; K_q 为对某个量子态的观察次数. 在报告量子态参数时,能容忍的最多受干扰量子态数为 $q - 1$, 所以 T_b 的最大值为 $T_{b\max} = q/f$, 应答信息的传输机制与量子态参数报告机制类似,有 $T_{c\max} = T_{b\max}$. 则

$$T_{j\max} = q \cdot \frac{1}{f} \cdot K_q + 2 \cdot q \cdot \frac{1}{f} = \frac{1}{f} \cdot q \cdot (2 + K_q). \quad (19)$$

当只有一个量子态收到干扰时,即 $i = 1$ 时,有量子态受干扰检测与计算平均时间的最小值

$$T_{j\min} = q \cdot \frac{1}{f_h} \cdot K_q + 2 \cdot \frac{1}{f_h} = (q \cdot K_q + 2) \cdot \frac{1}{f}. \quad (20)$$

由于量子状态跳变的遍历性,若量子状态跳变序列中相邻两个量子态不重复,有

$$T_j = \frac{1}{f} [q \cdot K_q + 2 \cdot (q \cdot P_{sr} + 1)], \quad (21)$$

其中 P_{sr} 为量子态被严重干扰的概率. 取 $f = 100$ Hz, $K_q = 3$, 讨论量子态数目与其被严重干扰的概率与平均自适应处理时间的关系,如图 6 所示.

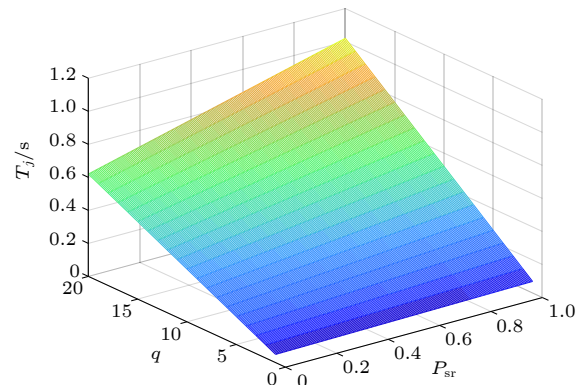


图 6 量子态数目、被严重干扰的概率与平均自适应处理时间的关系

Fig. 6. Relationship between the number of quantum states, the probability of serious interference, and the mean adaptive processing time.

量子态跳自适应处理是一个暂态过程, 量子态数目越多, 被严重干扰的概率越大, 暂态持续时间越长. 在经过处理后, 系统进入一个相对稳定的状态.

5.3 量子状态跳自适应控制策略系统增益

根据量子状态跳自适应处理策略, 受干扰的量子态数目为 q_j , 设成功处理的受干扰量子态数的概率为 P_{me} , 经量子态跳自适应处理, 系统的误码率近似为

$$P_j = \frac{1}{2} \cdot (1 - P_{me}) \cdot \frac{q_j}{q}. \quad (22)$$

设 t 为量子状态跳自适应处理持续时间, 有 $t_{max} = T_j$, 则 (22) 式可改写为

$$P_j = \frac{1}{2} P_{sr} \left(1 - \frac{ft}{qK_q + 2(qP_{sr} + 1)} P_{me} \right). \quad (23)$$

当 $t = t_{max}$ 时, 系统达到稳态. 在同干扰情况下, 未经量子状态跳自适应处理的系统稳态误码率为 $\frac{1}{2} \cdot P_{sr}$. 定义量子状态跳自适应控制策略的误码率增益 A_q 为

$$A_q = \log \frac{2(q \cdot P_{sr} + 1) + q \cdot K_q}{q(K_q + 2P_{sr}) - f \cdot t_{max} \cdot P_{me} + 2}. \quad (24)$$

取 $q = 30$, $P_{sr} = 0.5$, 量子态跳自适应控制策略系统增益如图 7 所示.

量子状态跳自适应控制策略系统误码率增益 A_q 随着成功处理受干扰量子态概率 P_{me} 的增大而增大. 当 $P_{me} = 0.8$ 时, 系统增益 $A_q = 0.699$; $P_{me} = 0.95$ 时, 系统增益 $A_q = 1.301$. 在基于 KEHM 的量子

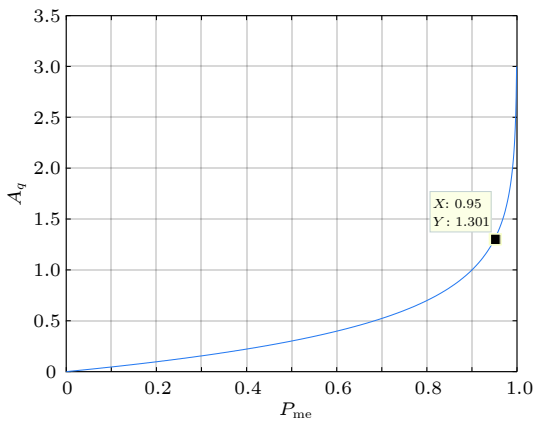


图 7 量子态跳自适应控制策略系统增益

Fig. 7. Gain of the quantum state hopping adaptive control system.

子状态跳变的自适应控制机制中, 通过提升系统处理受干扰量子态的能力, 能进一步降低基于 KEHM 的量子状态跳变通信系统的误码率, 使量子状态跳变系统性能得到明显改善.

6 结 论

面向广域量子卫星通信网全天候通信问题, 针对雾霾、沙尘等自然环境干扰下自由空间量子通信的性能及生存能力, 根据在背景干扰下一个量子态持续时间越长, 被干扰的概率越大的特性, 提出了基于 KEHM 的量子状态自适应跳变通信策略, 对该策略的可行性进行了理论研究, 并对其性能进行了定量分析. 仿真结果表明, 在自然环境背景干扰下, 采取量子状态跳变通信策略, 通过改变量子状态跳变的频率及量子态数目等, 能够有效降低量子通信系统的误比特率, 提升量子信息传输的成功率, 并且通过量子状态跳变的自适应控制机制, 进一步优化了量子通信系统的抗干扰能力. 该策略极大的增强了量子通信系统的综合免疫力, 确保量子信息网络的安全性, 为未来广域量子卫星通信网的健康发展提供了重要参考.

参考文献

- [1] Jin X M, Ren J G, Yang B 2010 *Nat. Photonics* **4** 376
- [2] Alessandro F, Rupert U, Thomas H, Matteo N, Robert P, Thomas S, Felix T, Thomas J, Anton Z 2009 *Nat. Phys.* **5** 389
- [3] Ma X S, Thomas H, Thomas S, Wang D Q, Sebastian K, William Nr, Bernhard W, Alexandra M, Johannes K, Elena A, Vadim M, Thomas J, Rupert U, Anton Z 2012 *Nature* **489** 269
- [4] Wang J Y, Yang B, Liao S K, Zhang L, Shen Q, Hu X F, Wu J C, Yang S J, Jiang H, Tang Y L, Zhong B, Liang H, Liu W Y, Hu Y H, Huang Y M, Qi B, Ren J G, Pan G S, Yin J, Jia J J, Chen Y A, Chen K, Peng C Z, Pan J W 2013 *Nat. Photonics* **7** 387
- [5] Wang X L, Cai X D, Su Z E 2015 *Nature* **518** 516
- [6] Davide E B, Timothy C, Ralph, Ivette F, Thomas J, Mohsen R 2014 *Phys. Rev. D* **90** 045041
- [7] Liao S K, Yong H L, Liu C, Shentu G L, Li D D, Lin J, Dai H, Zhao S Q, Li B, Guan J Y, Chen W, Gong Y H, Li Y, Lin Z H, Pan G S, Pelc S J, Fejer M M, Zhang W Z, Liu W Y, Yin J, Ren J G, Wang X B, Zhang Q, Peng C Z, Pan J W 2017 *Nat. Photonics* **11** 509
- [8] Nie M, Shang P G, Yang 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]
- [9] 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]

- [10] Ivan C, Andrea T, Alberto D, Francesca G, Rupert U, Giuseppe V, Paolo V 2012 *Phys. Rev. Lett.* **109** 200502
- [11] 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]
- [12] 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]
- [13] 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]
- [14] 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]
- [15] 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]
- [16] 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]
- [17] Zhang Y D 2010 *Quantum Mechanics* (Beijing: Science Press) p343 (in Chinese) [张永德 2010 量子力学 (北京: 科学出版社) 第343页]
- [18] Zhang Y D 2010 *Advanced Quantum Mechanics* (Beijing: Science Press) p24 (in Chinese) [张永德 2010 高等量子力学 (北京: 科学出版社) 第24页]
- [19] Marco L (translated by Zhou W X, Wu M Y, Hu M C, Jin L) 2013 *Quantum Radar* (Beijing: Publishing House of Electronics Industry) pp15–17 (in Chinese) [马科 L 著 (周万幸, 吴鸣亚, 胡明春, 金林 译) 2013 量子雷达 (北京: 电子工业出版社) 第15–17页]
- [20] Yin H, Han Y 2013 *Quantum Communication Principle and Technology* (Beijing: Publishing House of Electronics Industry) p100 (in Chinese) [尹浩, 韩阳 2013 量子通信原理与技术 (北京: 电子工业出版社) 第100页]

An adaptive quantum state-hopping communication strategy based on kangaroo entanglement hopping model*

Nie Min¹⁾ Wei Rong-Yu^{1)†} Yang Guang¹⁾²⁾ Zhang Mei-Ling¹⁾
Sun Ai-Jing¹⁾ Pei Chang-Xing³⁾

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 28 January 2019; revised manuscript received 22 March 2019)

Abstract

Quantum communication in free space will be disturbed by natural environment such as fog and dust. However, to build a global quantum satellite wide area communication network, we must solve the problem of 24-h all-weather communication between satellite and earth. With the evolution of time, the degree of interference becomes deeper. In order to improve the performance of quantum communication under such an interference, in this paper we analyze the change of single quantum state channel over time under the background interference, and propose an quantum state-hopping communication strategy based on the kangaroo entanglement hopping model (KEHM), and simulate the performance and parameters of the strategy. Kangaroos are social animals. When they are frightened, they will jump synchronously in the same way with the same step length, height and frequency. According to this model, we make the two communicating parties realize synchronous quantum state jump according to the prearranged pattern. The simulations show that when the ratio between the average power of background quantum noise and the average power of quantum signal is 5, the quantum bit error rate decreases from 0.4524 to 0.1116 with the quantum state hopping frequency increasing from 1 to 15. When the single quantum state transmission success rate is 0.95 and the quantum bit rate is greater than 200 qubit/s, the probabilities of successful transmission of quantum bits at different state hopping frequencies are greater than 0.97. When the quantum reception efficiency of the receiver is 0.8, the quantum state pass rate increases from 0.3667 to 0.9986 with the average quantum number of the source increasing from 1 to 10. When the average quantum number of the source is 6, the passing rate of quantum state increases from 0.6262 to 0.9855 with the quantum receiving efficiency of the receiver increasing from 0.2 to 0.99. However, if the average quantum number of the transmitter is large enough and the receiving efficiency of the receiver is close to 1, the passing rate of the quantum state is also close to 1. The adaptive control strategy of quantum state hopping is based on real-time quantum channel state detection. Its core idea is to remove the quantum states which are seriously disturbed from the quantum state hopping set, and to realize the synchronous hopping of communication parties on the quantum states with low interference. Adopting the strategy of quantum state hopping adaptive control can further reduce the quantum bit error rate of the system. The error rate gain of adaptive control system increases with the increase of the success probability of processing the disturbed quantum state. When the probability of processing the disturbed quantum state is 0.95, the system error rate gain can reach 1.301. The performance of quantum state hopping system is improved obviously. To sum up, the adaptive quantum state-hopping communication strategy based on the kangaroo entanglement hopping model proposed in this paper greatly enhances the comprehensive immunity of the system and ensures the security of quantum information network, and provides an important reference for the healthy development of wide-area quantum satellite communication network in the future.

Keywords: free space quantum communication, background quantum noise, quantum state hopping, bit error rate

PACS: 03.67.Hk, 03.67.-a

DOI: 10.7498/aps.68.20190163

* 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