

激光与光电子学进展

自然环境多因子背景下的量子卫星通信 纠缠波分接入策略

聂敏¹, 刘媛^{1*}, 张帆¹, 杨光^{1,2}, 孙爱晶¹, 张美玲¹, 裴昌幸³

¹西安邮电大学通信与信息工程学院, 陕西 西安 710121;

²西北工业大学电子信息工程学院, 陕西 西安 710072;

³西安电子科技大学综合业务网国家重点实验室, 陕西 西安 710071

摘要 针对多环境因子对大气能见度的影响,提出了一种在自然环境多因子背景下的量子卫星通信纠缠波分接入策略。当每对地面通信站分配量子密钥时,它们会通过量子卫星形成不同波长的纠缠对,并根据不同波长的量子纠缠,将众多地面通信站接入同一颗卫星。仿真结果表明,在大气湿度和雾霾粒子浓度相同的情况下,采用纠缠波分接入技术,可使系统的信道容量增大,量子误码率从 3.3415×10^{-3} 减小到 2.243×10^{-3} ,由大气能见度的影响所导致的误码率的增幅减小。由此可见,在环境多因子背景下的纠缠波分接入策略对量子卫星通信性能有明显的改善。

关键词 光通信; 量子卫星通信; 纠缠波分接入; 环境多因子; 信道容量; 信道误码率

中图分类号 TN929.12

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0906004

Entanglement Wavelength Access Strategy of Quantum Satellite Communication Under the Background of Multiple Factors in Natural Environment

Nie Min¹, Liu Yuan^{1*}, Zhang Fan¹, Yang Guang^{1,2}, Sun Aijing¹,
Zhang Meiling¹, Pei Changxing³

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

²School of Electronics and Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710072, China;

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

Abstract Aiming at the impact of multiple environmental factors on atmospheric visibility, this study proposes an entangled wave division access strategy of quantum satellite communication under the background of multiple factors in a natural environment. When each pair of ground stations distributes quantum keys, they can form entanglement pairs of different wavelengths through the quantum satellite. According to quantum entanglement of different wavelengths, many ground stations can connect to the same satellite. The simulation results show that under the same atmospheric humidity and haze particle concentration, the system's channel capacity increases, and the bit error rate decreases from 3.3415×10^{-3} to 2.243×10^{-3} . The increase in the bit error rate caused by atmospheric

收稿日期: 2020-07-22; 修回日期: 2020-09-13; 录用日期: 2020-10-16

基金项目: 国家自然科学基金(61971348, 61201194)、陕西省国际科技合作与交流计划(2015KW-013)、陕西省教育厅科研计划项目(16JK1711)

*E-mail: 1506820463.@qq.com

visibility factors will also decrease. Thus, in the environmental multifactorial context, the entangled wave-split access strategy can improve the quantum satellite communication performance.

Key words optical communications; quantum satellite communications; entanglement wavelength access; environmental multifactor; channel capacity; channel error rate

OCIS codes 060.5565; 010.2940; 060.4510

1 引言

2004 年底,潘建伟团队在 13 km 的自由空间尝试了量子密钥分发(QKD)并取得了重大进展,实验结果表明,在穿透大气层后,光子纠缠态的量子特性仍可以得到有效保持,这为量子卫星通信的可行性奠定了基础^[1]。2020 年 6 月 15 日,世界著名期刊 *Nature* 在线刊登了中国科技大学潘建伟院士团队的最新研究成果——“基于纠缠的千公里级安全量子加密”,该成果实现了量子卫星通信基于纠缠的无中继量子保密通信^[2]。当利用量子卫星进行通信组网时,一颗量子卫星同时需要服务多个地面站。如果不同的地面站之间采用合适的接入策略,则可以避免不同地面站之间的相互干扰^[3-4]。然而,迄今为止,有关多个地面站对同一颗卫星的多址接入技术的研究,尚未展开。为此,本文提出了纠缠波分接入(EWA)策略,建立了信道容量、量子误码率与 EWA 系统中可用信道数的数学模型,给出了环境多因子下的消光系数、可用信道数和量子卫星通信

距离之间的定量关系。

当每一对地面通信站分发量子密钥时,将使用量子卫星来制造具有不同波长的量子纠缠对。近年来,多数地区雾霾天气日益严重,各种环境因素会造成量子卫星通信性能的下降^[5-10],因此,本文以雾霾粒子浓度、大气湿度、能见度等为主要影响因素,提出了一种自然环境多因子^[11-13]背景下的量子卫星通信纠缠波分接入策略。该策略有效提升了量子卫星的资源利用率,为天地一体化量子通信网络的构建提供了理论依据。

2 量子卫星通信纠缠波分接入策略

2.1 基于 QKD 星地量子保密通信系统

对于量子卫星通信链路,发射光束由地面终端发出后,先经过地球表面的大气层,然后进入自由空间传输,在接收面上,量子卫星终端对量子信号进行接收和测量,并通过后续的信号处理得到所需要的量子信息。图 1 给出了星地量子通信终端基于 QKD 的量子保密通信系统的结构示意图。

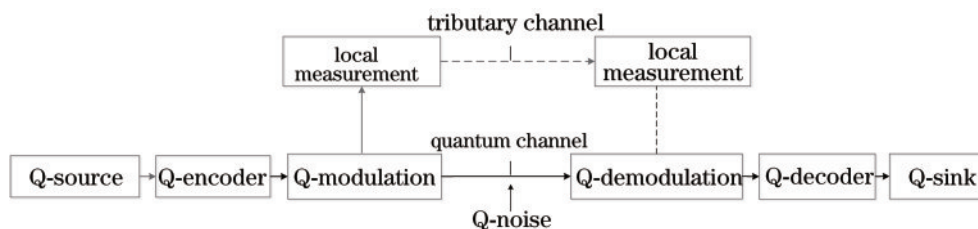


图 1 基于量子噪声信道的量子通信系统模型

Fig. 1 Quantum communication system model based on quantum noise channel

如图 1 所示,量子信息是由量子信号源(Q-source)产生,然后由编码器(Q-encoder)将该信息转变成量子比特通过调制器(Q-modulation)进行调制,之后将量子态信息经由信道进行传输,依次通过解调器(Q-demodulation)、译码器(Q-decoder)对传输的量子比特进行处理,最后到达量子信宿(Q-sink)从而完成整个量子通信。其中信道包括量子信道(Quantum Channel)和辅助的经典信道(Tributary Channel),量子比特会通过量子测量装置(Local measurement)处理之后利用辅助信道进

行传输。模型中的量子噪声(Q-noise)是指环境对量子信号的影响。本文主要是针对自然环境多因子背景下的量子信道 EWA 策略进行研究。

2.2 量子卫星通信链路纠缠波分接入策略

本文提出的策略是当每对地面通信站进行 QKD 时,量子信道通过不同波长划分成多个信道并进行量子纠缠,从而实现多个地面通信站对同一颗卫星的纠缠接入。如图 2 所示,在理想的大气信道条件下,星地量子保密通信链路中采用 EWA 策略进行研究,以波长作为用户端的标识,实现数据的高速传送。

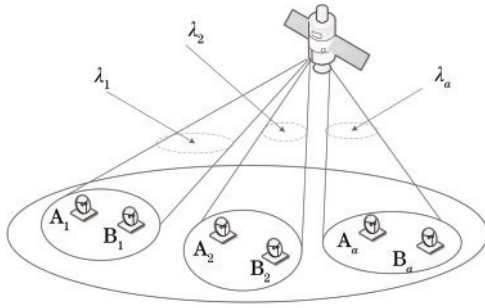


图 2 量子卫星通信 EWA 示意图

Fig. 2 Schematic diagram of EWA for quantum satellite communication links

从离散纠缠源中产生一对最大纠缠光子对,然后通过特定的分配渠道将其分配给很多个地面站通信用户^[14]。利用不同的波长并通过波分复用器(WDM)将纠缠光子对分配给不同的子信道,也就是说将一条物理通信渠道划分成多个不同波长的支路信道,从而实现量子信道的波分接入技术。图 3 说明了单纠缠源量子信道 EWA 策略的原理:离散纠缠源(DES)产生的光子纠缠对以特定的波长发送给多个地面通信站。地面接收端包含 3 个重要器件,即衰减器(At.)、相位调制器(PM)、法拉第镜(FM)。

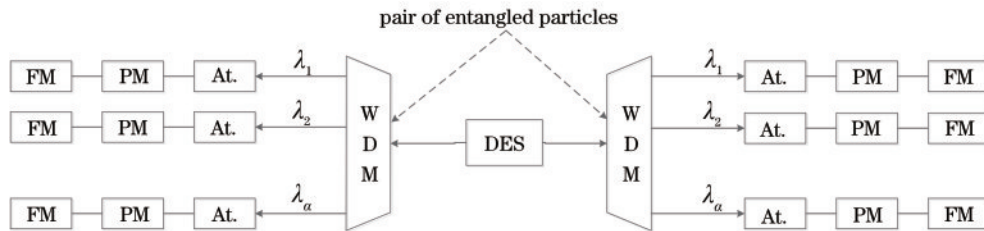


图 3 单纠缠源量子信道 EWA 策略的原理图

Fig. 3 Schematic diagram of a single-entangled source quantum channel EWA strategy

3 自然环境干扰下的纠缠波分接入策略量子卫星通信性能

在一定的环境背景下,量子卫星通信中的量子信号总是会与环境因素发生相互作用,从而导致消相干现象^[15]。量子噪声(Q-noise)就是环境因素对传送信息所产生的干扰。对于量子卫星通信来说,量子信道处于大气和自由空间中,自由空间是一个非常复杂的环境系统,近些年来,由于环境的恶化,多地的雾霾天气日益严重,这对实现量子卫星通信产生了一定程度的影响。本文根据雾霾粒子浓度和大气中的气溶胶分子对星地光量子传输的影响,得出量子光信号传输时的链路衰减系数 A ^[16]的表达式,即

$$A = 10 \cdot A_T \cdot l \cdot \lg e, \quad (1)$$

其中 A_T 为自然环境下的消光系数, l 为量子信号的传输距离。根据米氏散射理论,得到自然环境下的消光系数为^[17]

$$A_T = \alpha_1 A_1 + \alpha_2 A_2, \quad (2)$$

式中: α_i 为自然环境中各粒子所占比例,且有 $\sum_i \alpha_i = 1, i = 1, 2$; A_i 为各粒子的消光系数,表达式为

$$A_i = \frac{\pi}{4} \int_0^\infty D_i^2 \cdot N(D_i) \cdot Q_i(m, x) dD_i, \quad (3)$$

式中: D_1, D_2 分别为大气中的气溶胶分子和雾霾粒子的粒径; $N(D_1), N(D_2)$ 分别为气溶胶分子、雾霾粒子的空间分布; $Q_i(m, x)$ 为各粒子的消光因子, m 为粒子的复折射率, x 为粒子尺寸系数。

为了能更加方便地分析复杂环境因子对空间链路的影响,引入能见度 S ,其表达式为^[17]

$$S = \frac{-\ln 0.02}{A_T}. \quad (4)$$

考虑到大气湿度对气溶胶粒子的影响, $D_1 = (1 - W)^{-(1/k)} D_0$,其中 W 为大气湿度, k 为常数, D_0 为干燥时气溶胶分子的粒径。由此可知,量子卫星通信受到的影响主要来源于雾霾中的细颗粒物。假设该细颗粒物成分相同,颗粒物形态为规则的球体,根据实际环境中的该细颗粒物粒子大小和米氏散射条件,可知雾霾粒子的直径 D_2 为 $10 \mu\text{m}$, $Q_2(m, x)$ 为一常量,得出空气湿度 W 、雾霾粒子浓度 N_h 和能见度 S 的关系如图 4 所示。

从图 4 中可以看出,能见度随着雾霾粒子浓度和空气湿度的增加而逐渐下降,当二者呈下降趋势时,能见度则会随之逐渐增大。当其中的任意一项已知、另外一项变化时,能见度同样会发生正相关变化。

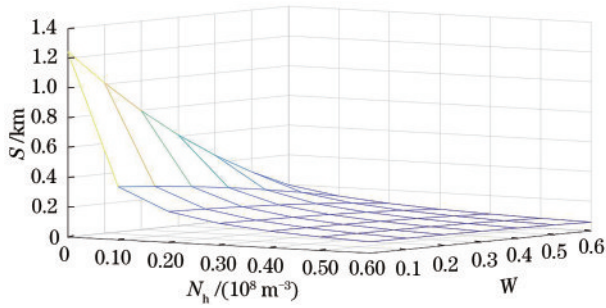


图 4 雾霾粒子浓度、空气湿度和能见度的关系

Fig. 4 Relationship among haze particle concentration, air humidity, and visibility

3.1 环境多因子干扰下纠缠波分接入系统的信道容量

在光量子信号传输的过程中,假设存在量子卫星通信 EWA 系统,可以同时传输多路信号,使得通信链路的传输能力成倍增长,密钥生成率增加。在量子卫星通信的 EWA 系统中,假设存在波长为 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_a$ 的 α 路光信号,且对应的波长信号 λ_a 的传输率 η_a 不尽相同。

对于单路波长为 λ_a 时振幅阻尼信道量子密钥分发过程,设环境的初态为 $|e_L\rangle$,量子系统的基态为

$|0\rangle$,环境作为激发态与量子系统基态发生相互作用,这个过程可以用量子位与环境组成的复合系统上的么正演化^[16]表示,即

$$U: \begin{cases} |0\rangle|e_L\rangle_L \rightarrow |0\rangle|e_L\rangle \\ |1\rangle|e_L\rangle \rightarrow \sqrt{1-p}|1\rangle|e_L\rangle + \sqrt{p}|0\rangle|e_N\rangle \end{cases}, \quad (5)$$

式中, $|e_N\rangle$ 为自由空间环境态, p 为量子位在比特翻转信道中,受混合粒子的影响丢失一个光子的概率^[7]。对环境态求偏迹可以得到

$$C_0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \sqrt{1-p} \end{bmatrix}, C_1 = \begin{bmatrix} 0 & \sqrt{p} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

其中 p 的表达式为

$$p = \frac{E_i - E_0}{E_i} = 1 - \exp(-A_T \cdot l) = 1 - 10^{-0.1A_T \cdot l}, \quad (7)$$

式中, E_i 为量子信息传输后的能量, E_0 为量子信息的初始能量。将(7)式代入 Kraus 表达式计算可得量子系统的初始化密度矩阵为

$$\rho = \begin{bmatrix} \rho_{00} & \rho_{01} \\ \rho_{10} & \rho_{11} \end{bmatrix}, \quad (8)$$

进一步将其演化,可得

$$\rho \rightarrow \varepsilon(\rho) \equiv \Phi(\rho) = \sum_p C_p \rho C_p^\dagger = \begin{bmatrix} \rho_{00} + p\rho_{11} & \sqrt{1-p}\rho_{01} \\ \sqrt{1-p}\rho_{10} & (1-p)\rho_{11} \end{bmatrix}, p=0,1, \quad (9)$$

式中: $\varepsilon(\rho)$ 表示初始化密度矩阵经过环境演化后所得的矩阵; Φ 是一个映射,表示量子系统和环境作用后的演化。

设信道容量为 C ,信源为 $\{p_i, \rho_i\}$,其中 p_i 为信源的量子字符 ρ_i 时的概率, $\sum p_i = 1$,当输入字符为

$\rho_0 = |0\rangle|0\rangle, \rho_1 = |1\rangle|1\rangle$ 时,有

$$\rho \rightarrow \varepsilon(\rho) \equiv \Phi(\rho) = \begin{bmatrix} 1 + pp_1 - p_1 & 0 \\ 0 & (1-p)p_1 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

其对应的诺依曼熵为

$$s[\varepsilon(\rho)] = -(1 + pp_1 - p_1) \log(1 + pp_1 - p_1) - (1-p)p_1 \log[(1-p)p_1], \quad (11)$$

收到字符的诺依曼熵为

$$s = p_1 [-p \log p - (1-p) \log(1-p)] = p_1 H(p), \quad (12)$$

式中 $H(p)$ 为二元熵,因此振幅阻尼信道的信道容量为^[18]

$$C = \max \left\{ s[\varepsilon(\rho)] - \sum_i p_i s[\varepsilon(\rho_i)] \right\}, i=0,1, \quad (13)$$

对(13)式求导,当 $p_1 = \frac{1}{(1+t)(1-p)}, t = 2 \frac{H(p)}{1-p}$ 时,取最大值,因此振幅阻尼信道的信道容量为

$$C = \max \left\{ \left[-(1 + pp_1 - p_1) \log(1 + pp_1 - p_1) - (1-p)p_1 \log(1-p)p_1 \right] - p_1 H(p) \right\}. \quad (14)$$

由于量子信号的强度很弱,从而导致其产生的四波混频等非线性效应极弱,因此各信道之间的串

扰可忽略不计^[19]。整个系统的量子通信信道容量应该是每一路信道之和,即

$$C_{\text{WDM}} = \sum_{N=1}^{\infty} C = \sum_{N=1}^{\infty} N \left\{ \max \left[- (1 + pp_1 - p_1) \log (1 + pp_1 - p_1) - (1 - p) p_1 \log (1 - p) p_1 \right] - p_1 H(p) \right\}, \quad (15)$$

式中 N 为用户数。

对振幅阻尼信道的信道容量与量子卫星通信网络中的用户数量以及自然环境多因子的能见度的关系进行仿真,仿真结果如图 5 所示。

由图 5(a)可知:当传输距离不变时,随着通信网络中的用户数增大,量子卫星通信的信道容量增大;当用户数一定时,随着信号传输距离的增加,光信号受到自然环境多因子的消光作用,

链路衰减增大,信道容量随之逐渐减少。由图 5(b)可知,当传输距离不变时,随着环境多因子与量子系统的量子态产生量子纠缠,量子态的相干性受到破坏,量子比特发生错误的概率增大,随之振幅阻尼的信道容量逐渐减小。因此,在量子卫星通信系统中的 EWA 策略能增加量子信道的信道容量,但环境因素对其的影响应当被充分考虑。

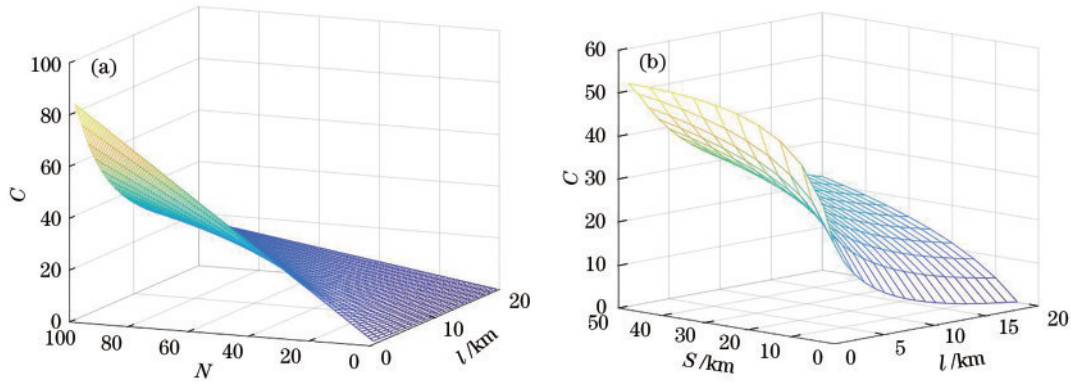


图 5 不同参数对振幅阻尼信道的信道容量的影响。(a)用户数和通信距离;(b)能见度 and 通信距离

Fig. 5 Effect of different parameters on channel capacity of the amplitude damping channel. (a) Number of users and communication distance; (b) visibility and communication distance

3.2 环境多因子干扰下纠缠波分接入系统的信道误码率

在量子噪声影响下,对于单路波长为 λ_a 的量子卫星通信过程,EWA 编码器用于确保传输的弱激光脉冲以相对应的波长 λ_m 发送给接收用户,诱骗态量子密钥分发可以采用弱相干光源来实现。假设发射的弱相干态光源的相位是随机的^[17],为了发送原始密钥给用户 $N(N = 1, 2, \dots)$,发送信号的量子态为

$$P_{m(\mu)} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\exp(-\mu)}{n!} \mu^n |n\rangle_{mm} \langle n|, \quad (16)$$

式中 $|n\rangle_{mm}$ 代表对应第 m 个波长的 n 光子福克态,其他的波长段不含光子;常取 $\mu = 0.1$ ^[17],此时多光子态的概率 $p_{\text{multi}} \approx 0.5\%$,即 $n > 2$ 时,概率 $p_{\text{multi}} < 0.5\%$,故在计算单光子态在整个脉冲中所占的比例时,取 $n \leq 2$ 。

当发射方发射一个脉冲时总的量子误码率^[15]可表示为

$$R_Q = \sum_{n=0}^2 Y_n p_n(\mu) e_n = \sum_{n=0}^2 Y_n e_n \frac{\exp(-\mu)}{n!} \mu^n, \quad n = 0, 1, 2, \quad (17)$$

式中: Y_n 为发射光子数态 n 时的计数率,它与信道噪声引起的接收端检测器的暗计数率 Y_0 、光子脉冲通过率 η_n 有关; e_n 为发射光子数态 n 时接收端的错误检测概率。光子的脉冲通过率 η_n 与环境多因子信道中光子的传输率 η_0 密切相关,可表示为 $\eta_n = 1 - (1 - \eta_0)^n$ 。 Y_n 和 e_n 可分别表示为

$$Y_n = Y_0 + \eta_n - Y_0 \eta_n, \quad (18)$$

$$e_n = \frac{e_0 Y_0 + e_d (1 - \eta_n)}{Y_n}, \quad (19)$$

其中 e_0 是暗计数中误探测的概率, e_d 是光子到达错误探测器的概率。在 EWA 的量子卫星通信系统中,可支持的用户数为 $M = N \cdot H$,其中每 N 个用户组成一个使用某波长的无源光网路,该网络共有 H 个可用信道。接收端探测器的暗计数率为^[20]

$$Y_0 = Y_{\text{WDM}} = (H - 1)\eta_B \mu \alpha_{\text{xt}}, \quad (20)$$

式中: α_{xt} 表示不同波长信道间的串扰因子, 假定对于不同的信道其值固定; η_B 为终端探测器的探测率。在环境多因子信道中, 光子的传输率 η_0 表示为

$\eta_0 = \exp(-r_d/\lambda_D) \cdot 10^{-A_r/100} \cdot \eta_B$, 其中 λ_D 为光子在自然空间多因子背景下的波长, r_d 为光子半径。因此, 环境多因子背景下 EWA 的量子卫星通信系统的信道误码率公式化简可得

$$R_{\text{WDM}} = (H - 1)e_0\eta_n\mu\alpha_{\text{xt}} + \sum_n \left[(H - 1)e_0\eta_n\mu\alpha_{\text{xt}} + e_d(1 - \eta_0)^n \right] \cdot \frac{\exp(-\mu)}{n!} \mu^n, \quad n = 1, 2. \quad (21)$$

根据文献 [20] 所给的参数, 即 $e_0 = 0.5$, $e_d = 3.3\%$, $\alpha_{\text{xt}} = 1$, $\eta_B = 0.045$, 可得在自然环境多因子背

景下 EWA 信道数与量子误码率的关系, 其仿真结果如图 6 所示。

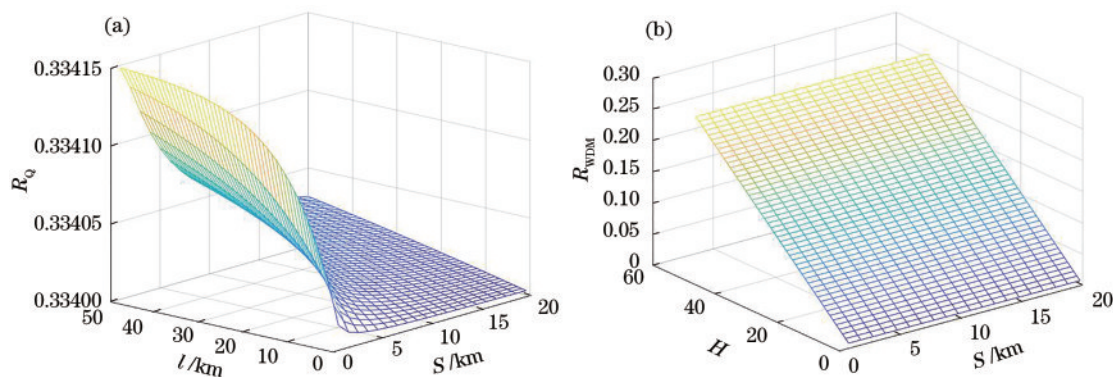


图 6 EWA 策略下不同参数对量子误码率的影响。(a) 通信距离和能见度; (b) 可用信道数和能见度

Fig 6 Effect of different parameters on quantum error rate under EWA strategy. (a) Communication distance and visibility; (b) number of available channel and visibility

由图 6(a) 可知, 环境干扰会使误码率增加, 这是因为在传输过程中, 自然环境中的多因子对光子态造成了干扰, 从而导致误码比特率增加, 总误码率增大, 进而导致量子卫星通信质量下降。当传输距离一定, 能见度增加到 20 km 时, 量子误码率从 3.3415×10^{-3} 减少到 3.34×10^{-3} 。由图 6(b) 可知: 当环境中多因子所导致的能见度一定时, 量子误码率会随着通信系统中的可用信道增加而增加; 当可用信道数一定, 能见度增加到 20 km 时, 量子误码率从 2.243×10^{-3} 增加到 2.697×10^{-3} 。显然, EWA 策略可以明显改善自然环境干扰下的量子卫星通信误码率, 使量子误码率的增加趋势减弱。因此, 在 EWA 策略下的量子卫星通信过程中, 应该根据自然环境状况及时调整相关参数, 确保其通信质量。

4 结 论

提出一种量子卫星通信的 EWA 策略系统, 通过仿真分析其可行性, 分析了该系统中划分的可用信道数、环境多因子导致的通信链路衰减系数对量子卫星通信性能的影响。针对振幅阻尼信道, 研究

了环境中多因子特性对信道容量和量子误码率的定量关系。结果表明, EWA 策略中划分的可用信道数越多, 量子的通信性能提升越显著。故本文提出的各参量之间的定量关系可为环境多因子背景下的量子卫星 EWA 策略通信提供参考。下一步可以将 EWA 策略与其他的多址接入策略相结合, 更好地满足多个地面站的量子卫星通信。

参 考 文 献

- [1] Peng C Z, Yang T, Bao X H, et al. Experimental free-space distribution of entangled photon pairs over 13 km: towards satellite-based global quantum communication[J]. Physical Review Letters, 2005, 94(15): 150501.
- [2] Yin J, Li Y H, Liao S K, et al. Entanglement-based secure quantum cryptography over 1120 kilometres [J]. Nature, 2020, 582(7813): 501-505.
- [3] Mao Q P, Zhao S M, Wang L, et al. Measurement-device-independent quantum key distribution based on wavelength division multiplexing technology[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2017, 34(1): 46-53.

- 毛钱萍, 赵生妹, 王乐, 等. 基于波分复用技术的测量设备无关量子密钥分发[J]. 量子电子学报, 2017, 34(1): 46-53.
- [4] Zhu Y, Shi L, Wei J H, et al. Coexistence system design of free space quantum-classical signal based on wavelength division multiplexing [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(8): 082702.
朱宇, 石磊, 魏家华, 等. 基于波分复用的空间量子-经典信号同传系统设计[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(8): 082702.
- [5] Nie M, Shang P G, Yang G, et al. Influences of mesoscale sandstorm on the quantum satellite communication channel and performance simulation [J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(24): 240303.
聂敏, 尚鹏钢, 杨光, 等. 中尺度沙尘暴对量子卫星通信信道的影响及性能仿真[J]. 物理学报, 2014, 63(24): 240303.
- [6] Nie M, Ren J M, Yang G, et al. Influences of the ice-water mixed clouds on the performance of quantum satellite communication [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, 45(9): 0927004.
聂敏, 任家明, 杨光, 等. 冰水混合云对量子卫星通信性能的影响 [J]. 光子学报, 2016, 45(9): 0927004.
- [7] Nie M, Chang L, Yang G, et al. Influence of different mixing patterns of haze particles and water cloud particles on the performance of quantum satellite communication [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46(7): 0701002.
聂敏, 常乐, 杨光, 等. 灰霾粒子与水云粒子不同混合方式对量子卫星通信性能影响[J]. 光子学报, 2017, 46(7): 0701002.
- [8] Jia N, Nie M, Yang G, et al. Influences of cosmic microwave background radiation on the quantum satellite down-chain communication performance and entanglement reserves [J]. *Journal of Quantum Optics*, 2017, 23(2): 111-121.
贾娜, 聂敏, 杨光, 等. 宇宙微波背景辐射对量子卫星信道性能及纠缠储备量的影响[J]. 量子光学学报, 2017, 23(2): 111-121.
- [9] Nie M, Tang S R, Yang G, et al. Influence of the ionospheric sporadic E layer on the performance of quantum satellite communication in the mid latitude region [J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(7): 259-269.
聂敏, 唐守荣, 杨光, 等. 中纬度地区电离层偶发 E 层对量子卫星通信性能的影响[J]. 物理学报, 2017, 66(7): 259-269.
- [10] Tang S R, Nie M, Yang G, et al. Influence of space dusty plasmas on the performance of quantum satellite communication [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46(12): 1206002.
唐守荣, 聂敏, 杨光, 等. 空间尘埃等离子体对量子卫星通信性能的影响 [J]. 光子学报, 2017, 46(12): 1206002.
- [11] Zhao Z J, Liao R, Lyke S D, et al. Direct detection free-space optical communications through atmospheric turbulence [C] // 2010 IEEE Aerospace Conference, March 6-13, 2010, Big Sky, MT, USA. New York: IEEE Press, 2010: 1-9.
- [12] Nie M, Zhao Y, Yang G, et al. Influence of the oceanic turbulence on performance of single photon acquisition probability [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(24): 242702.
聂敏, 赵元, 杨光, 等. 海洋湍流对单光子捕获概率的影响 [J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(24): 242702.
- [13] Nie M, Zhang Y X, Yang G, et al. Influences of ice crystal particles on the detection performance of quantum interference radar [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(13): 130101.
聂敏, 张怡心, 杨光, 等. 冰晶粒子对量子干涉雷达探测性能的影响 [J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(13): 130101.
- [14] Liu X H. Study on scheme and protocol of multi-user quantum communication [D]. Xi'an: Xidian University, 2013.
刘晓慧. 多用户量子通信方案及协议研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013.
- [15] Pei C X, Zhu C H, Nie M, et al. Quantum communication [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2013: 78-84.
裴昌幸, 朱畅华, 聂敏, 等. 量子通信: 研究生系列教材 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2013: 78-84.
- [16] Yin H, Ma H X. Introduction to military quantum communication [M]. Beijing: Military Science Press, 2006: 224-229.
尹浩, 马怀新. 军事量子通信概论 [M]. 北京: 军事科学出版社, 2006: 224-229.
- [17] Ren J, Nie M, Yang G, et al. Influences of multiple factors of natural environment on the performance of free space quantum communication [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, 44(12): 146-150.
任杰, 聂敏, 杨光, 等. 自然环境中多因子对自由空间量子通信性能的影响 [J]. 光子学报, 2015, 44(12): 146-150.

- [18] Yin H, Han Y. Principles and technology of quantum communication [M]. Beijing: Publishing House of Electronics industry, 2013: 76-130.
尹浩, 韩阳. 量子通信原理与技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2013: 76-130.
- [19] Yoshino K I, Fujiwara M, Tanaka A, et al. High-speed wavelength-division multiplexing quantum key distribution system [J]. Optics Letters, 2012, 37 (2): 223-225.
- [20] Li W J. Research on multiplexing and single-photon wavelength conversion in quantum communication networks[D]. Xi'an: Xidian University, 2014.
李万杰. 量子通信网络多址及单光子波长变换技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.