

降雪干扰下基于演化博弈的低轨量子卫星多用户切换策略

薛长春^{1*}, 聂敏¹, 杨光¹, 张美玲¹, 孙爱晶¹, 裴昌幸²

¹西安邮电大学通信与信息工程学院 (人工智能学院), 陕西 西安 710121;

²西安电子科技大学空地一体化综合业务网全国重点实验室, 陕西 西安 710071

摘要 低轨道量子卫星是构建全球天地一体化量子保密通信网的重要组成部分。单颗低轨量子卫星服务时间有限, 为了保证卫星与地面用户之间的持续通信, 地面终端需要及时切换至其他可供服务的卫星。为了解决降雪环境干扰下地面多用户量子卫星切换场景下的阈值判决问题, 分析了大气雪环境对量子星地链路的衰减影响, 提出了一种基于演化博弈的多属性量子卫星切换策略。根据用户的带宽、卫星剩余服务时间及链路衰减三个属性定义效用函数, 根据星间传输时延、信道纠缠度定义开销函数, 最终得到用户的收益函数, 建立演化博弈切换模型。仿真结果表明, 该策略具有稳定性和公平性, 能够有效均衡卫星的负载, 且与基于最低链路衰减和最优纠缠度的单属性切换策略相比, 切换成功率分别提升了 1.2% 和 1.5%, 这对未来降雪干扰环境下低轨量子卫星网络的多用户动态切换有一定的参考意义。

关键词 量子卫星; 演化博弈; 收益函数; 降雪

中图分类号 TN929.1; O431.2 **文献标志码** A

DOI: 10.3788/AOS230750

1 引言

相比于传统通信, 量子通信结合量子力学与密码学等理论, 具有高保密、高抗干扰性, 有望彻底改变信息的传输和加密方式, 并不断朝着构建可扩展量子网络的方向发展^[1], 如量子密钥分发 (QKD), 在经济、国防等重要领域已经由纯粹的理论转变为实用技术^[2-4], 逐步建立起具有数字签名加密等技术的量子安全网络。但由于设备缺陷及探测等损耗, 增加 QKD 的比特率和范围是一项艰巨但重要的挑战。文献^[5-6]使用相位相干光信号和辅助测量站, 使安全密钥速率突破了无中继密钥容量。文献^[7]通过对两个干涉检测进行后匹配来实现异步双光子 Bell 状态测量, 在没有相位跟踪和相位锁定的条件下超过了密钥容量, 为可扩展的量子通信网提供了实验基础。文献^[8]证明了使用激光脉冲对抗状态准备缺陷和脉冲相关性等潜在源缺陷的高效四相测量设备独立 QKD 的安全性, 显著提高了安全密钥速率、延长了传输距离。

低轨道量子卫星网是构建高保密、高容量、低延迟的全球化量子通信链路必不可少的一部分。自“墨子号”成功发射以来, 已经有诸多学者验证了低轨量子卫星与地面终端之间传输的可行性^[9-11]。2017 年,

Takenaka 等^[12]在地面站与一个微型卫星之间通过四光子计数器成功区分了每脉冲约 0.146 个光子的量子态, 验证了星地量子密钥分发的适用性。2020 年, 潘建伟团队^[13]实现了从卫星到 1200 km 外的地面站之间的量子密钥分发。2022 年, Trinh 等^[14]结合深度学习的长短期记忆递归神经网络报道了世界上第一个近地轨道微卫星与地面站之间的大气通道统计模型实验, 为低轨量子卫星网络的构建提供了参考。

低轨道量子卫星的高度范围为 500~1000 km, 相对于地面终端移动速度快, 可供服务时间有限, 且用户通常需要在 3~4 min 之内切换下一颗卫星, 因此多用户与卫星之间的切换判决策略是目前构建量子卫星通信星座亟待解决的问题。文献^[15]提出了以信道链路衰减最低为阈值的切换策略, 提高了灰霾环境背景下用户的切换成功率。文献^[16]提出了一种基于纠缠度阈值的卫星切换策略, 提升了链路通信质量和服务的连续性。文献^[17]分析了通信仰角对量子卫星通信的信道误码率、生存能力等各项性能参数的影响, 验证了以可变仰角作为切换判决准则的可行性。然而上述方法均仅以单属性 (如纠缠度、最小链路衰减、通信仰角) 作为切换判决准则, 只能达到单属性性能上的最优, 牺牲了其他属性的优势, 同时也未考虑用户之间的相互

收稿日期: 2023-07-03; 修回日期: 2023-07-27; 录用日期: 2023-08-03; 网络首发日期: 2023-08-15

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项目 (2015KW-013)、陕西省自然科学基金基础研究计划 (2021JM-464)

通信作者: *534881507@qq.com

影响,这会造成量子卫星的负载失衡和资源分配不均,严重时甚至会导致卫星切换失败或者通信中断。

演化博弈论由 Smith 和 Price^[18]于 1973 年首次提出。演化博弈理论将生物进化特性与博弈论结合,可以检验不同策略在环境中的生存和复制能力,通过不断地比较和模仿,在多次选择的过程中使系统最终达到稳定。在实际的量子卫星切换中,同时进行卫星切换的用户并不能完全理性地知道彼此的状态信息,这满足了演化博弈的非有理性条件。为使用户得到更加公平的卫星资源,均衡量子卫星的负载,本文考虑了降雪对量子星地链路的影响,基于演化博弈论,提出了一种多属性判决的卫星切换方法。

2 降雪背景下星地量子信号传输特性分析

由于量子保密通信中的量子信号一般为弱光信号,其对自由空间中的尘埃、雨雪等大气因素较为敏感,从而产生吸收、散射等效应,严重影响光量子信号的传输特性。考虑降雪环境与大气湍流的影响,光量子信号在传输过程中的信道总衰减^[19]为

$$A_{\text{all}} = A_{\text{snow}} L \times 10^{-3} + 10 \lg \left[\frac{L^2 \lambda^2}{D_T D_R} \frac{1}{T_T (1 - L_p) T_R} \right] + 10 \lg \left(1 + \frac{D_T^2}{r_0^2} \right), \quad (1)$$

式中: A_{snow} 为降雪产生的链路衰减; L 为光量子信号传输长度; λ 为光信号波长,取典型值 $\lambda = 860 \text{ nm}$; D_T 为发送端望远镜口径,取值为 $D_T = 100 \text{ mm}$; D_R 为接收端望远镜口径,取值为 $D_R = 300 \text{ mm}$; T_T 和 T_R 分别为望远镜传输因子,取 $T_T = T_R = 1$; r_0 表示大气相干长度,即大气湍流对大气的影 响程度,取值为 $r_0 = 0.09 \text{ m}$; L_p 为定位损耗,取 $L_p = 5\%$ 。

降雪会对星地量子链路产生突发干扰,为方便研究雪粒子特性,用降雪强度 S 作为描述降雪量大小的参数,具体可划分为小雪($S < 2.5 \text{ mm/h}$)、中雪($2.5 \text{ mm/h} < S \leq 5 \text{ mm/h}$)、大雪($5 \text{ mm/h} < S \leq 10 \text{ mm/h}$)及暴雪($S > 10 \text{ mm/h}$)四个等级^[20]。在现有研究中,Gamma 函数对雪花粒子谱分布拟合效果较佳,根据文献[21],以东亚地区的平均值作为参考值,雪尺度谱分布函数与雪花融合为水滴的等效直径 D 的关系表示为

$$N(D) = 2035.1 \exp(-\Delta D), \quad (2)$$

式中: Δ 为谱分布斜率,与降雪强度的关系满足经验公式 $\Delta = 25.5 S^{-0.48}$ 。根据 Mie 散射理论,单位体积内雪花的消光系数与雪谱分布函数 $N(D)$ 间的关系表示为

$$\sigma_{\text{ext}} = \frac{\pi}{4} \int_0^{\infty} D^2 k_{\text{ext}}(D, \lambda, m) \cdot N(D) dD, \quad (3)$$

式中: $k_{\text{ext}}(D, \lambda, m)$ 为雪花的消光因子,由于雪花粒子的最小直径远大于光信号的波长(850~1550 nm),因

此取 $k_{\text{ext}}(D, \lambda, m) = 2$ ^[22]。光量子信号传输时由降雪突发干扰所造成的能量衰减^[23]为

$$E = E_0 \exp(-\sigma_{\text{ext}} L), \quad (4)$$

式中: E_0 为初始能量; E 为降雪环境下传输距离 L 后的能量。取对数形式,得到降雪对通信链路产生的衰减为

$$A_{\text{snow}} = 10 \cdot \sigma_{\text{ext}} \cdot \lg e, \quad (5)$$

式中: A_{snow} 的单位为 dB/km。取光量子信号波长 $\lambda = 860 \text{ nm}$,对不同降雪强度下通信链路的总衰减 A_{all} 与传输距离 L 之间的关系进行仿真,结果如图 1 所示。

从图 1 可以看出:当降雪强度一定时,随着光量子传播距离的增加,链路受到的总衰减也随之增加;当光量子信号的传播距离一定时,随着降雪强度的增大,光量子信号在大气中与雪粒子之间的散射及吸收效应加剧,导致通信链路的总衰减随之增大。如取光量子传输距离 $L = 80 \text{ km}$,在小雪($S = 2 \text{ mm/h}$)、中雪($S = 5 \text{ mm/h}$)及大雪($S = 10 \text{ mm/h}$)的环境下,总链路衰减分别为 40 dB、48 dB 及 67 dB。由此可见,大气降雪环境会对量子卫星通信产生极大的影响。

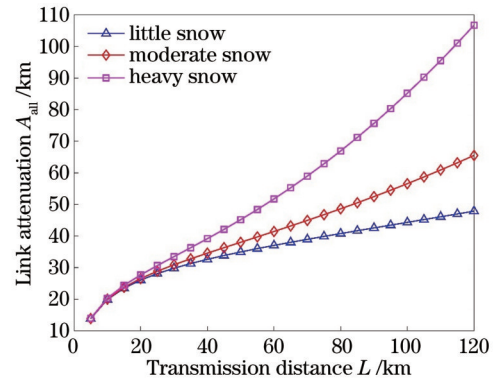


图 1 不同降雪强度下链路总衰减与光量子传输距离的关系
Fig. 1 Relationship between the total attenuation of links and the transmission distance of optical quanta under different snowfall intensities

对于低轨道量子卫星通信网而言,当终端用户通过量子卫星进行通信时,为避免降雪突发干扰使通信链路产生中断,用户端需要根据降雪信道特征,以及卫星仰角及卫星剩余服务时间等参数,及时搜索并切换至其他可供服务的卫星继续保持信息交换,且需满足卫星的负载均衡。本文提出一种基于演化博弈的量子卫星多用户切换策略,通过博弈策略,各用户终端在达到通信性能的前提下,同时满足量子卫星资源分配的公平性,降低了切换次数,提升了卫星的通信效率及降雪环境下通信的可靠性。

3 基于演化博弈的低轨道量子卫星多用户切换算法

3.1 多用户演化博弈切换模型

在低轨道量子卫星组成的通信网络中,某一区域

的终端用户可能被多个量子卫星波束同时覆盖,网络覆盖模型如图 2 所示。

为解决降雪等大气环境衰减因素或当前星负载过大等原因导致的当前卫星服务质量差的问题,终端用户须及时切换接入其余可供服务的量子卫星,继续保持通信。而在实际的卫星切换选择过程中,终端用户相互之间无法知道彼此的理性信息,如果仅选择单一指标(如通信仰角、信道纠缠度、卫星剩余服务时间等)进行一次选择的切换判决方法,易导致卫星资源分配不公,陷入局部最优,造成当前选择卫星负载过重或切换失败。针对上述问题,本文考虑降雪对星地链路的衰减干扰影响及终端用户关联切换量子卫星的过程,建立演化博弈模型,通过博弈及动态选择机制,实现量子卫星资源分配的纳什均衡。

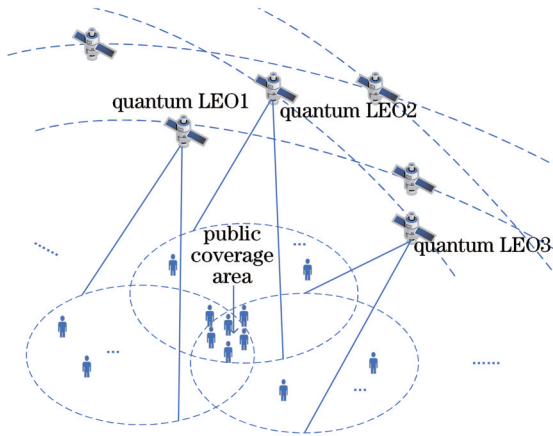


图 2 低轨道量子卫星网络覆盖模型图

Fig. 2 Low orbit quantum satellite network coverage model diagram

假设某一区域内需要进行切换的用户数为 N , 其中第 j 个用户表示为 $U_j, j \in \{1, 2, \dots, N\}$, 此时满足覆盖该区域的量子卫星数量为 S , 其中第 i 个量子卫星表示为 $L_i, i \in \{1, 2, \dots, S\}$, 然后对演化博弈的要素进行分析。

1) 博弈方。定义量子卫星分配资源的 N 个用户 $U_j, j \in \{1, 2, \dots, N\}$ 为一个种群, 种群中的用户个体设为博弈方。

2) 策略。博弈方所能关联的量子卫星, 每一种策略对应一颗候选量子卫星 $L_i, i \in \{1, 2, \dots, S\}$, 终端用户和量子卫星之间的选择关系用 p_{ij} 表示, 取值集合为 $\{0, 1\}$ 。当 $p_{ij} = 1$ 时, 表示当前博弈方 U_j 与量子卫星 L_i 相关联, 且规定用户一次只能选择一颗候选卫星, 即 p_{ij} 满足约束 $\sum_{i=1}^S p_{ij} = 1$ 。

3) 收益。在量子卫星通信切换网络中, 用户选择卫星 L_i 时所获得的服务质量, 表示为博弈方选择策略的效用函数与开销函数的差值。

4) 群体比例。定义为选择某种策略 i 的用户数量

$$n_i = \sum_{j=1}^N p_{ij} \text{ 与种群数量 } N \text{ 的比值, 即 } x_i = \frac{n_i}{N}, \text{ 可以看出, 满足约束条件为 } \sum_i x_i = 1.$$

3.2 收益函数分析

效用函数用来描述用户对选择策略的满意程度。在低轨道量子卫星通信网络系统中, 卫星服务质量是影响用户选择策略的主要因素。本文综合考虑终端用户与量子卫星通信时的带宽、卫星剩余服务时间及卫星仰角三个属性建立用户的效应函数。量子卫星可分配给用户的带宽对应了当前卫星的负载状态, 接入卫星的用户数量 n_i 与卫星带宽成反比, 即: 用户数越多, 每个用户可获得的量子卫星带宽资源越少, 且此时卫星负载越高, 容易导致用户在切换卫星时接入拥堵甚至切换失败; 量子卫星的剩余服务时间越长, 表示选择该策略使用户的服务周期越长, 减少了用户的切换次数; 通信仰角 θ 反映了星地链路的信道状况, 通信仰角越大, 表示通信距离越短, 链路衰减越小, 信道状况越佳。但是在实际通信过程中, 仰角较难实时测量, 且由于地形环境的遮挡, 测得的仰角并不能真正体现信道状况的好坏, 因此本文考虑降雪环境干扰的影响, 将通信仰角转化为可直接表示信道状况的链路衰减特性。通过上述分析可知, 带宽、卫星剩余服务时间及链路衰减三个影响因子相互制约, 若只通过设定单种属性进行切换阈值判决, 则会丢失其他两方面的性能, 无法保证卫星资源分配的最大化。

对部分参数进行归一化后, 定义用户选择策略 i 时的效用函数为

$$U_i = \alpha \frac{C_i}{n_i} + \beta \frac{A_{\text{snow}}^i - A_{\text{snow}}^{\min}}{A_{\text{snow}}^{\max} - A_{\text{snow}}^{\min}} + \xi \frac{T_i^{\max} - t}{T_i^{\max}}, \quad (6)$$

式中: C_i 是量子卫星 L_i 的容量; A_{snow}^i 为降雪环境干扰下用户选择策略 i 时的链路衰减值, 可由式(1)计算得出; A_{snow}^{\min} 和 A_{snow}^{\max} 分别表示降雪干扰下的最小和最大链路衰减值, 为了满足量子通信中违背 Bell 不等式的条件, 信噪比需满足 5.89:1, 即通信总的链路损耗需小于 60 dB^[24], 超过该值则认为当前星地链路已经中断, 需要切换至候选卫星, 故取 $A_{\text{snow}}^{\max} = 60 \text{ dB}$; T_i^{\max} 为卫星 L_i 覆盖用户的最大时间; $T_i^{\max} - t$ 表示 t 时刻选择策略 i 的量子卫星剩余服务时间。 α, β, ξ 分别表示带宽影响权重、信道衰减影响权重、服务时间影响权重, 且满足 $\alpha + \beta + \xi = 1$ 。

卫星 i 对地面的平均最大覆盖时间^[25]表示为

$$T_i^{\max} = \frac{2}{\omega} \arccos \left(\frac{\cos \gamma_{\max}}{\cos \gamma(t_0)} \right), \quad (7)$$

式中: $\omega = \omega_s - \omega_e \cos \phi$; ω_s 分别为地心地固坐标系及地心惯性坐标系中卫星运行的角速度; $\omega_e \approx 7.2921 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$ 为地球自转角速度; ϕ 为轨道倾角; $\gamma(t_0)$ 为

终端用户对应的地心角; γ_{\max} 为终端最小通信仰角所对应的地心角。

在切换过程中,当多用户同时连接至同一个卫星时,会超出卫星负载,导致链路中断。为了平衡卫星的资源,定义开销函数为用户数 n_i 的函数,即当同时接入卫星 L_i 的数目 n_i 增多时,各个用户的开销函数值增大,此时对应的用户收益函数会减小,用户需要寻找其他可供服务的卫星切换,使自身的收益函数增大,最终使各个用户之间获得的卫星资源达到均衡状态。星地量子卫星通信中,星间传输时延反映了链路传输信道的干扰情况,时延越高,信道越差,用户连接过程中所需要的开销便越大。参考文献[26]提出的两端纠缠量子卫星网络构建方法中,量子信息从源节点卫星传输至目的节点卫星之间的传输时延为

$$T = \frac{m}{2} T' + (m - 2) T^*, \quad (8)$$

式中: T' 为节点间 Bell 基测量的平均时间; T^* 为节点间的无线传输时延; m 为中间卫星传输的节点数。选择不同源节点卫星进行传输的时延不同, T 值越大,则卫星耗费资源越多,用户所需要的开销越大。定义演化博弈模型中用户的开销函数为

$$K_i = \omega_1 n_i \cdot T + \omega_2 \cdot \frac{1}{G}, \quad (9)$$

式中: ω_1 、 ω_2 分别为链路传输时延权重因子、纠缠度传输因子; n_i 为接入卫星 L_i 的用户数; G 为降雪环境下的量子信道纠缠度。纠缠度用来衡量粒子间的纠缠特性,是重要的信道资源。信道纠缠度越大,表示当前卫星信道质量越好,用户开销越小,否则表示用户开销越大,故开销函数值与纠缠度成反比。假设系统输入字符为 $\rho_1 = |0\rangle\langle 0|$, $\rho_2 = |1\rangle\langle 1|$, 降雪环境态会与系统发生么正演化,过程表示为

$$\begin{cases} |0\rangle_s |0\rangle_j \rightarrow |0\rangle_s |0\rangle_j \\ |1\rangle_s |0\rangle_j \rightarrow \sqrt{1-p} |1\rangle_s |0\rangle_j + \sqrt{p} |0\rangle_s |1\rangle_j \end{cases}, \quad (10)$$

式中: $|0\rangle_s$ 为系统的基态; $|1\rangle_s$ 为系统的激发态; $|0\rangle_j$ 、 $|1\rangle_j$ 为大气降雪环境下的基矢。由文献[17]可知,大气降雪环境下的复合系综量子纯态 $|\varphi\rangle = \chi_1 |00\rangle_s + \chi_2 |11\rangle_s$, χ_1 、 χ_2 分别为 $|00\rangle_s$ 和 $|11\rangle_s$ 的概率,且有 $\chi_1^2 + \chi_2^2 = 1$ 。考虑幅值阻尼信道,其信道纠缠度^[27]可表示为

$$G = 2(1-p)(\chi_1 \chi_2 - \chi_2^2 p), \quad (11)$$

式中: $p = 1 - 10^{-0.1 \cdot A_{\text{snow}} \cdot L}$ 表示大气雪环境干扰使光子发生丢失的概率值。

由上述分析,最终得到用户连接卫星 L_i 的收益函数为

$$O_i = U_i - K_i. \quad (12)$$

用户需要进行切换时,可根据式(12)得到各自的

收益函数值,进而计算此覆盖区域内的平均收益后进行广播,之后用户以该值进行演化模仿学习,切换策略决策。所有用户的平均收益表示为

$$\bar{O} = \sum_i x_i O_i. \quad (13)$$

3.3 基于演化博弈的低轨量子卫星切换算法

目前的量子卫星切换策略通常只考虑卫星仰角或信道情况(如纠缠度或链路衰减等),并未考虑用户之间的影响过程。在本文的演化博弈模型中,切换时博弈方观察自己的收益与平均收益的值,当 $O_i < \bar{O}$ 时,用户会寻找并切换至高收益的卫星,经过不断的动态选择,直到 $O_i = \bar{O}$ 时,达到卫星资源的演化均衡。复制动态方程表示了演化过程中的动态调整,可表示为

$$\Delta_i = \mu x_i [O_i - \bar{O}], \quad (14)$$

式中: μ 为种群学习率,作用是调整策略选择的速度; Δ 为用户关联卫星 L_i 的群体比例的变化率。若 $\Delta_i > 0$,则表示选择 L_i 的用户数增多;若 $\Delta_i < 0$,则表示选择 L_i 的用户数减少。假设图 2 中可供选择的策略为 Quantum LEO1、Quantum LEO2,多用户选择切换区域为 public coverage area,推导出 Quantum LEO1 的复制动态方程为

$$\Delta_1 = \mu x_1 [O_1 - x_1 O_1 - (1 - x_1) O_2]. \quad (15)$$

根据上述分析,得到降雪背景下基于演化博弈的量子卫星多用户切换策略过程如下。

步骤 1: 有 U_j 个用户需要进行卫星选择,根据式(5)计算大气降雪环境下的链路衰减值 A_{snow} 。

步骤 2: 各用户根据式(12)计算选择策略 i 时的收益值 O_i 。

步骤 3: 量子卫星控制端根据式(13)得到所有用户的平均收益 \bar{O} ,并发送给所有需要进行卫星切换的用户。

步骤 4: 各博弈方不断对自身收益 O_i 与平均收益 \bar{O} 的值进行比较,如果用户收益小于平均收益,则切换其他可以使自身收益增大的卫星,直至本次自身收益大于上次收益。

步骤 5: 博弈方在关联至新的卫星后,控制器判断卫星目前的负载情况,调整接入用户的数量,从而改变用户的开销,保证卫星的负载均衡,重新返回步骤 2 执行,直至各博弈方达到演化均衡,即最终满足 $O_i = \bar{O}$,随后通过 Bell 态测量建立量子传输信道。

4 仿 真

假设需要同时进行切换的多用户数量为 1000,可供选择的策略数 $i = 2$,分别为 Quantum LEO1、Quantum LEO2,采用文献[26]提出的蒲公英球型结构量子卫星网络结构进行仿真。由于用户所能分得的带宽是由量子卫星的带宽直接决定的,带宽对效用函数的影响更大^[28],而信道衰减及卫星服务时长决定用户是否需要选择新的策略。假设信道衰减及卫星服务

时长对效用函数的影响相同,则设置带宽影响权重为 $\alpha=0.4$ 、信道衰减影响权重为 $\beta=0.3$ 、服务时间影响权重为 $\xi=0.3$ 。目前,量子信道传输采用波长为 800 nm 左右的近红外波长和 1660 nm 左右的远红外波长,对这两种波长的选择主要考虑了单光子探测效率对信号传输的影响。目前,最实用的单光子探测技术是基于半导体雪崩效应完成的,其要求入射光子的能量一定要大于半导体的禁带宽度,由于波长短的光子能量高,即 860 nm 波长的探测效率高于 1550 nm 波长的探测效率,因此光量子信号的波长取典型值 $\lambda=860\text{ nm}$ ^[19]。其余参数见表 1 所示。

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameter

Simulation parameter	Value
Orbital height /km	500
Orbital plane	10
Number of satellites per orbit	14
Track plane inclination /($^{\circ}$)	86
Transmission delay weighting factor	0.6
Entanglement transmission factor	0.4
Population learning rate μ	2
Bandwidth of Quantum LEO1 /Mbit	100
Bandwidth of Quantum LEO2 /Mbit	70
Probability of χ_1	$1/\sqrt{2}$
Probability of χ_2	$1/\sqrt{2}$
Optical quantum transmission distance L /km	100
Number of intermediate satellite transmission nodes m	5

图 3 仿真了 6 次切换实验过程中选择策略 Quantum LEO1 的用户数量随迭代次数的变化情况。

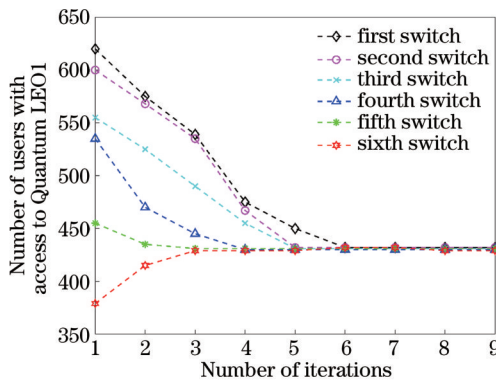


图 3 接入 Quantum LEO1 的用户数随迭代次数的变化

Fig. 3 Variation of the number of users connected to Quantum LEO1 with the number of iterations

从图 3 中可以看出,迭代开始时刻接入 Quantum LEO1 的数量不同,随着迭代次数的增加,最终接入 Quantum LEO1 的用户数量趋于平稳,即各个用户均达到了同一均衡状态。由此可见,所提出的量子卫星

多用户切换策略具有很好的收敛稳定性。

图 4 仿真了对不同迭代次数下接入 Quantum LEO1、Quantum LEO2 的用户收益变化。

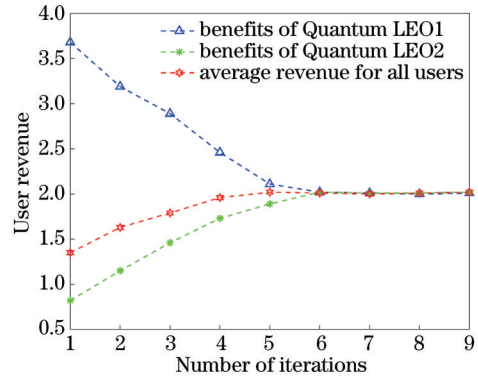


图 4 用户收益随迭代次数的变化关系

Fig. 4 Relationship between user revenue and the number of iterations

从图 4 中可以看出,迭代开始阶段,两颗卫星各自的总收益有较大的差距,随着博弈的进行,它们的收益开始逐渐收敛至所有用户的平均收益,迭代至第 6 次时达到了均衡状态,此后的迭代过程中,单个博弈方无论如何改变自己的策略选择,均不能使其自身的收益值增加,系统达到了稳定,这保证了多用户在量子卫星切换过程中的公平性。

权重因子反映了切换时的准则,如在一次通信过程中,需要以最小切换次数为准则,则要求卫星提供最长的服务时间,即可以设置权重因子为 $\alpha=0$ 、 $\beta=0$ 、 $\xi=1$ 。图 5 对多用户采用单属性判决接入 Quantum LEO1 的策略与本文提出的多属性判决接入 Quantum LEO1 的策略进行了对比。从图中可以发现,单属性判决切换方法相比于多属性切换决策来说收敛速度快,且最终达到均衡时接入 Quantum LEO1 的用户数量也有所增加,但这牺牲了其他属性的优势。

设置轨道高度为 300 km,系统呼损率为 5%,切换时可供选择的卫星数为 2,在多用户需要进行选择切

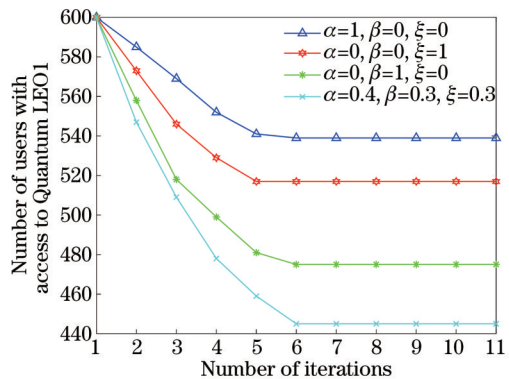


图 5 不同准则下接入 Quantum LEO1 的用户数

Fig. 5 Number of users with access to Quantum LEO1 under different standards

换的区域 public coverage area 内,图 6 对文献[14]中提出的基于最小链路衰减切换策略与本文所提的基于演化博弈切换策略的系统切换成功率进行了对比。

从两种不同切换策略的成功率随该区域内同时切换至 Quantum LEO1 的用户数的变化情况中可以看出,随着关联该卫星的用户数增多,量子卫星的负载增大,通信可靠性下降,两种策略的切换成功率均呈减小状态。但本文所提策略由于用户之间的博弈,考虑了用户之间的切换均衡,同时以降雪为具体的传输环境,考虑了链路衰减、最长服务时间等多属性因素对切换判决的影响,通过判断收益值使量子卫星的资源均衡分配,因此可以有效提升切换过程的成功率。如当切换用户数为 660 时,基于演化博弈的切换策略相比于基于链路衰减最低的量子卫星切换策略的切换成功率上升了 1.2%。

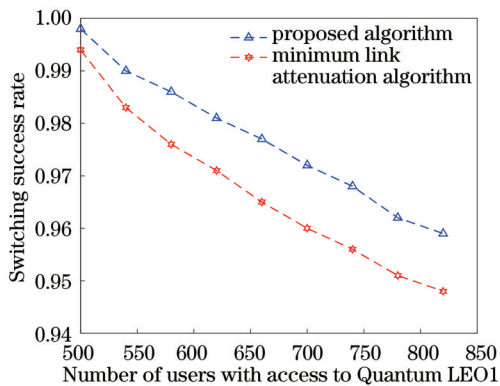


图 6 不同策略下的切换成功率

Fig. 6 Switching success rates under different strategies

文献[16]提出了一种基于最优纠缠度的切换方法,通过设置纠缠度阈值,低于阈值的用户选择候选卫星中纠缠度最大的卫星进行切换,从而保证链路的正常通信。设置最小纠缠度阈值 $G_{\min} = 0.8$,在多用户需要进行选择切换的区域 public coverage area 内,选择单卫星的切换方式,通过 Bell 基测量,建立量子信道。设置轨道高度为 500 km,用户呼损率为 5%,候选卫星个数为 2,图 7 对基于纠缠度的切换策略与本文所提策略的切换成功率进行了对比。

从图 7 中可以看出,两种策略的切换成功率随着接入 Quantum LEO1 用户数的增多均呈减小趋势,但本文所提策略的切换成功率仍大于基于最优纠缠度策略的切换成功率。且随着卫星用户数的增多,卫星负载增大,本文所提策略考虑了用户之间的博弈过程,根据用户方所得到的卫星资源进行切换判决,使切换成功率下降趋势有所减缓,性能上有所提升。而基于最优纠缠度的切换方法只考虑了单属性的优势,因此当接入用户增多时,卫星负载增大,导致切换失败。因此,本文所提策略通过计算不同用户自身的收益进行切换的判决,在满足负载要求的情况下,有效地提升了

切换的成功率。如当切换用户数为 700 时,基于演化博弈的切换策略比基于最优纠缠度切换策略的切换成功率提升了 1.5%。

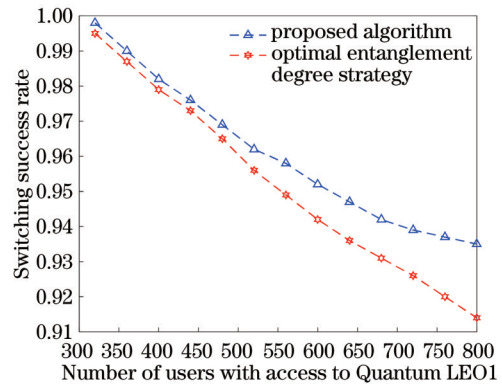


图 7 本文算法与最优纠缠度策略的切换成功率对比

Fig. 7 Comparison of the switching success rate between the proposed algorithm and the optimal entanglement degree strategy

5 结 论

本文针对降雪环境下量子卫星多用户切换场景,提出了一种基于演化博弈的量子卫星切换策略。然后,分析了影响量子卫星切换判决的多种属性,并结合量子星地链路间的衰减特性,得到了用户的效应函数与开销函数,进而得到用户的平均收益函数。综合考虑了用户与用户之间、用户与量子卫星之间的传输情况,构建了演化博弈模型,并对使用该模型的切换策略性能进行仿真。结果表明,本文提出的策略考虑了多属性之间的影响,不仅具有较好的稳定性,还能够使量子卫星的负载相对均衡。最后,通过与其他单属性量子卫星切换方法相比,本文所提策略也能更有效地提升用户切换的成功率,为未来量子卫星通信的可靠性及有效性设计提供一定的参考。

参 考 文 献

- [1] Pirandola S, Ottaviani C, Spedalieri G, et al. High-rate measurement-device-independent quantum cryptography[J]. Nature Photonics, 2015, 9(6): 397-402.
- [2] Braunstein S L, Pirandola S. Side-channel-free quantum key distribution[J]. Physical Review Letters, 2012, 108(13): 130502.
- [3] Lo H K, Curty M, Tamaki K. Secure quantum key distribution [J]. Nature Photonics, 2014, 8(8): 595-604.
- [4] Yin H L, Fu Y, Li C L, et al. Experimental quantum secure network with digital signatures and encryption[J]. National Science Review, 2023, 10(4): nwac228.
- [5] Lucamarini M, Yuan Z L, Dynes J F, et al. Overcoming the rate-distance limit of quantum key distribution without quantum repeaters[J]. Nature, 2018, 557(7705): 400-403.
- [6] Minder M, Pittaluga M, Roberts G L, et al. Experimental quantum key distribution beyond the repeaterless secret key capacity[J]. Nature Photonics, 2019, 13(5): 334-338.
- [7] Xie Y M, Lu Y S, Weng C X, et al. Breaking the rate-loss bound of quantum key distribution with asynchronous two-photon interference[J]. PRX Quantum, 2022, 3(2): 020315.
- [8] Gu J, Cao X Y, Fu Y, et al. Experimental measurement-device-

- independent type quantum key distribution with flawed and correlated sources[J]. *Science Bulletin*, 2022, 67(21): 2167-2175.
- [9] Bedington R, Arrazola J M, Ling A. Progress in satellite quantum key distribution[J]. *NPJ Quantum Information*, 2017, 3: 30.
- [10] 朱秋立, 石磊, 魏家华, 等. 基于偏振滤波抑制背景光的量子密钥分配系统[J]. *光学学报*, 2018, 38(12): 1227001.
Zhu Q L, Shi L, Wei J H, et al. Quantum key distribution system based on polarization filtering for background light suppression[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(12): 1227001.
- [11] Liao S K, Yong H L, Liu C, et al. Long-distance free-space quantum key distribution in daylight towards inter-satellite communication[J]. *Nature Photonics*, 2017, 11(8): 509-513.
- [12] Takenaka H, Carrasco-Casado A, Fujiwara M, et al. Satellite-to-ground quantum-limited communication using a 50-kg-class microsatellite[J]. *Nature Photonics*, 2017, 11(8): 502-508.
- [13] Yin J, Li Y H, Liao S K, et al. Entanglement-based secure quantum cryptography over 1, 120 kilometres[J]. *Nature*, 2020, 582(7813): 501-505.
- [14] Trinh P V, Carrasco-Casado A, Takenaka H, et al. Statistical verifications and deep-learning predictions for satellite-to-ground quantum atmospheric channels[J]. *Communications Physics*, 2022, 5: 225.
- [15] 聂敏, 赵新宇, 杨光, 等. 灰霾背景下基于最优链路的低轨道量子卫星星间切换策略[J]. *量子光学学报*, 2017, 23(1): 31-39.
Nie M, Zhao X Y, Yang G, et al. The handover strategy of low orbit quantum satellite based on optimal link under the background of haze[J]. *Journal of Quantum Optics*, 2017, 23(1): 31-39.
- [16] 聂敏, 寇文翔, 杨光, 等. 沙尘暴背景下基于最优纠缠度的双卫星地链路切换策略[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(17): 172702.
Nie M, Kou W X, Yang G, et al. Switching strategy of dual-satellite satellite-ground link based on optimal entanglement degree in background of sandstorm[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(17): 172702.
- [17] 聂敏, 车俊丽, 杨光, 等. 基于可变仰角阈值的低轨道量子卫星切换策略及性能分析[J]. *现代电子技术*, 2018, 41(17): 1-5, 10.
Nie M, Che J L, Yang G, et al. Handover strategy of low orbit quantum satellite based on variable elevation angle threshold and its performance analysis[J]. *Modern Electronics Technique*, 2018, 41(17): 1-5, 10.
- [18] Smith J M, Price G R. The logic of animal conflict[J]. *Nature*, 1973, 246(5427): 15-18.
- [19] 尹浩, 马怀新. 军事量子通信概论[M]. 北京: 军事科学出版社, 2006: 247-251.
Yin H, Ma H X. Introduction to military quantum communication[M]. Beijing: Military Science Press, 2006: 247-251.
- [20] 潘佩翀, 解宏伟, 魏加华. 高海拔地区冬季降雪滴谱特征分析[J]. *青海大学学报*, 2020, 38(1): 81-86.
Pan P C, Xie H W, Wei J H. Analysis of droplet spectrum characteristics of winter snowfall in high altitude area[J]. *Journal of Qinghai University*, 2020, 38(1): 81-86.
- [21] 谢槟泽, 王金虎, 蔡嘉哈, 等. 基于时域有限差分法的雪花粒子群多次散射研究[J]. *气象科技*, 2020, 48(3): 313-321.
Xie B Z, Wang J H, Cai J H, et al. Multiple scattering of snowflake particles based on finite-difference time-domain method[J]. *Meteorological Science and Technology*, 2020, 48(3): 313-321.
- [22] 高太长, 刘西川, 张云涛, 等. 降雪现象与能见度关系的探讨[J]. *解放军理工大学学报(自然科学版)*, 2011, 12(4): 403-408.
Gao T C, Liu X C, Zhang Y T, et al. Relationship research between snowfall and visibility[J]. *Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2011, 12(4): 403-408.
- [23] 张秀再, 徐茜, 刘邦宇. 雾对自由空间量子通信性能的影响[J]. *光学学报*, 2020, 40(7): 0727001.
Zhang X Z, Xu X, Liu B Y. Influence of fog on performance of free-space quantum communication[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(7): 0727001.
- [24] 张秀再, 周丽娟, 董千恒, 等. 近海污染大气对自由空间量子通信性能的影响[J]. *科学技术与工程*, 2022, 22(32): 14267-14274.
Zhang X Z, Zhou L J, Dong Q H, et al. Influence of offshore air pollution on quantum communication performance in free space[J]. *Science Technology and Engineering*, 2022, 22(32): 14267-14274.
- [25] 杨斌, 何锋, 靳瑾, 等. LEO 卫星通信系统覆盖时间和切换次数分析[J]. *电子与信息学报*, 2014, 36(4): 804-809.
Yang B, He F, Jin J, et al. Analysis of coverage time and handoff number on LEO satellite communication systems[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(4): 804-809.
- [26] 聂敏, 郭建伟, 卫容宇, 等. 基于两端纠缠交换的量子卫星网络路由协议仿真[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(3): 0306002.
Nie M, Guo J W, Wei R Y, et al. Simulation of quantum satellite network routing protocol based on two-end entanglement exchange[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(3): 0306002.
- [27] 刘晋, 缪波, 胡强, 等. 两比特“X”态的量子非局域关联检验[J]. *量子光学学报*, 2020, 26(1): 1-6.
Liu J, Miao B, Hu Q, et al. Testing quantum nonlocality with two qubit X states[J]. *Journal of Quantum Optics*, 2020, 26(1): 1-6.
- [28] 汪伊婕, 赵伟, 成飞, 等. 基于负载均衡的大规模低轨卫星互联网路由算法[J]. *天地一体化信息网络*, 2022, 3(1): 27-34.
Wang Y J, Zhao W, Cheng F, et al. Large scale LEO satellite Internet routing algorithm based on load balancing[J]. *Space-Integrated-Ground Information Networks*, 2022, 3(1): 27-34.

Multi-User Switching Strategy of Evolutionary Game-Based Low-Orbit Quantum Satellite Under Snowfall Disturbance

Xue Changchun^{1*}, Nie Min¹, Yang Guang¹, Zhang Meiling¹, Sun Aijing¹, Pei Changxing²

¹*School of Communications and Information Engineering & School of Artificial Intelligence, Xi'an University of Posts & Telecommunications, Xi'an 710121, Shaanxi, China;*

²*State Key Laboratory of Integrated Service Networks, Xidian University, Xi'an 710071, Shaanxi, China*

Abstract

Objective Low-orbit quantum satellites are part of building a global secure communication network. However, as single quantum satellites move fast relative to ground terminals with limited service time and the satellite-ground quantum link is susceptible to atmospheric conditions (e. g. rain, snow, haze, etc.), ground end-users need to switch to other satellites available for service in time to meet the sustainable communication demands. In the common coverage area, if the user only chooses the currently proposed single-attribute decision strategy, such as the minimum communication elevation angle, the optimal entanglement degree or the minimum link attenuation, the optimal single attribute can be achieved with losing the advantage of other attributes. This will easily result in load imbalance and uneven resource allocation of quantum satellites, and even communications may be interrupted in serious cases. To this end, we consider the attenuation interference of snowfall on the satellite-ground link and the process of end-user-associated switching of quantum satellites, and build a multi-attribute evolutionary game switching model to achieve Nash equilibrium in the allocation of quantum satellite resources. Meanwhile, satellite resource allocation can be maximized to enhance the switching success rate of users in the low earth orbit (LEO) quantum satellite communication network.

Methods Evolutionary game theory combines biological evolutionary properties with game theory to make the system stable through constant comparison and imitation in multiple choices. In actual quantum satellite switching, the users switching satellites at the same time do not know each other's state information in a completely rational way, which satisfies the non-rational conditions of evolutionary games. We analyze the quantum channel attenuation characteristics under snowfall and atmospheric turbulence according to the Gamma spectral distribution function of snow and obtain the variation of channel attenuation with transmission distance. The bandwidth that can be allocated to users by the quantum satellite corresponds to the current satellite load state, which means that more users result in fewer quantum satellite bandwidth resources available to each user. The longer remaining service time of the quantum satellite indicates that the selection of this strategy prolongs the service cycle of the user and reduces the user switching number. The communication elevation angle reflects the channel condition of the satellite-ground link, and the larger communication elevation angle leads to shorter communication distance, lower link attenuation, and better channel conditions. As the elevation angle is difficult to measure in real time with the terrain environment obstruction, the measured elevation angle cannot reflect the channel conditions, and thus the communication elevation angle is converted into the link attenuation characteristics which can directly represent the channel conditions. Therefore, we define a utility function based on the user's bandwidth, remaining satellite service time, and link attenuation, and define an overhead function based on the inter-satellite transmission delay and channel entanglement to obtain the user's payoff function. Finally, we derive the dynamic replication equation of the satellite to build an evolutionary game switching model.

Results and Discussions Firstly, the effect of snowfall on the satellite-ground link attenuation is analyzed. Under certain snowfall intensity, the total attenuation suffered by the link increases as the light quantum propagation distance rises. In the case of a certain propagation distance of the light quantum signal, as the snowfall intensity increases, the total communication link attenuation grows due to the scattering and absorption effect between the light quantum signal and snow particles in the atmosphere. It results in the subsequent increase in the total communication link attenuation, and the atmospheric snowfall environment will exert a significant influence on quantum satellite communications (Fig. 1). The number of users to be switched simultaneously is 1000 and the number of available strategies is 2. In the six switching experiments, the number of users selected for Quantum LEO1 varies with the iteration number (Fig. 3), and the number of users plateaus with the increasing iteration number, which demonstrates that the proposed quantum satellite multi-user switching strategy has sound convergence stability. As the game proceeds, the gains gradually converge to the average gain of all users and reach equilibrium by the sixth iteration. Then the users revenue do not increase and stabilize to ensure the multi-user fairness during the quantum satellite switching (Fig. 4). The single-attribute judgment switching method converges faster than the multi-attribute switching decision, and the number of users connected to Quantum LEO1

increases when equilibrium is finally reached, but this is at the expense of the other attributes (Fig. 5). Experimental results show that the switching strategy based on the evolutionary game improves the switching success rate by 1.2% over the switching strategy based on the lowest link attenuation (Fig. 6) under the switching user number of 660. When the minimum entanglement threshold is set to 0.8, the switching success rate of the evolutionary game-based switching strategy improves by 1.5% over the switching strategy based on the optimal entanglement (Fig. 7) under the switching user number of 700.

Conclusions An evolutionary game-based quantum satellite switching strategy is proposed for the multi-user switching scenario of quantum satellites under a snowfall environment. Various attributes affecting the quantum satellite switching decision are analyzed and combined with the attenuation characteristics between quantum star-ground links to obtain the effect function, the overhead function, and then the average gain function of users. An evolutionary game model is built by considering the transmission among users and between users and quantum satellites, and the performance of the switching strategy using this model is simulated. The results show that the proposed strategy not only has sound stability with the influence among multiple attributes considered but also can make the quantum satellite load relatively balanced. Finally, compared with the single-attribute quantum satellite switching strategy based on minimum link attenuation and optimal entanglement, the proposed strategy can also improve the success rate of user switching more effectively, providing references for future multi-user dynamic switching design of low-orbit quantum satellite networks under snowfall interference environment.

Key words quantum satellite; evolutionary game; payoff function; snowfall