



仿雁群阵列量子空中通信组网构建策略

姚明辉 聂敏 杨光 张美玲 孙爱晶 裴昌幸

Construction strategy of quantum air communication network of imitation goose swarm array

Yao Ming-Hui Nie Min Yang Guang Zhang Mei-Ling Sun Ai-Jing Pei Chang-Xing

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 150303 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20220158

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220158>

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

共轭线性对称性及其对-对称量子理论的应用

Conjugate linear symmetry and its application to -symmetry quantum theory

物理学报. 2020, 69(3): 030301 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191173>

基于新CH₂O势能面的反应量子波包动力学

Wave packet quantum dynamics of reaction based on new CH₂O surface

物理学报. 2020, 69(8): 083401 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200132>

基于超绝热捷径技术快速制备超导三量子比特Greenberger-Horne-Zeilinger态

Superadiabatic scheme for fast generating Greenberger-Horne-Zeilinger state of three superconducting qubits

物理学报. 2019, 68(3): 030302 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181922>

MgO衬底上YBa₂Cu₃O₇台阶边沿型约瑟夫森结的制备及特性

Fabrication and characterization of YBa₂Cu₃O₇ step-edge Josephson junctions on MgO substrate for high-temperature superconducting quantum interference devices

物理学报. 2021, 70(3): 037401 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201291>

基于蛛网结构的量子卫星广域网构建策略及性能仿真

Construction strategy and performance simulation of quantum satellite wide area network based on cobweb structure

物理学报. 2021, 70(14): 140303 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210556>

光纤激光基模光束的因子

factor of fundamental mode of fiber laser beam

物理学报. 2021, 70(20): 204203 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210281>

仿雁群阵列量子空中通信组网构建策略*

姚明辉^{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, 西安 710121)

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

(2022年1月21日收到; 2022年3月26日收到修改稿)

量子卫星通信是量子通信领域的研究热点和前沿, 具有覆盖面广、通信效率高和安全性强的特点. 量子通信组网的构建策略是量子通信的重要组成部分, 然而, 有关量子空中通信组网构建策略的研究, 迄今尚未展开. 本文采用仿生学原理, 根据雁群空中飞行阵列的特点, 提出了一种仿雁群 Λ 型量子空中通信组网拓扑结构, 该结构可分为单头节点 Λ 型和多头节点 Λ 型. 基于 Greenberger-Horne-Zeilinger (GHZ) 态的可认证 QSDC 网间通信系统和 GHZ-EPR (Einstein-Podolsky-Rosen) 量子卫星组网隐形传态通信系统, 对该 Λ 型量子空中通信组网结构的误码率、能耗、吞吐率等参数进行了研究. 理论分析和仿真结果表明, 仿雁群单头节点 Λ 型组网结构, 在噪声平均功率谱密度为 2 dB/m 的环境中, 当网中头节点与子节点的通信距离小于 400 m 时, 误码率小于 0.094; 若头节点与子节点的通信距离由 400 m 增大到 1000 m 时, 误码率增长较快, 达到 0.585; 当单侧子节点数由 2 增加到 7 时, 吞吐率由 110.6 kb/s 下降到 46.45 kb/s. 以总节点数 21 为例, 单头节点 Λ 型组网结构可节省 32.6% 的能量, 吞吐率下降到 23.9 kb/s. 相比之下, 总节点数为 21 的多头节点 Λ 型组网结构, 可节省 29.3% 的能量, 吞吐率达到 163.4 kb/s. 由此可见, 采用仿雁群阵列结构的量子空中组网, 具有很好的网络可扩展性、优良的信息安全性和灵活的网络结构.

关键词: 仿雁群 Λ 型网络结构, 量子空中通信组网, 能耗分析, Greenberger-Horne-Zeilinger 态

PACS: 03.67.Hk, 03.67.Ac

DOI: 10.7498/aps.71.20220158

1 引言

量子通信和量子信息处理, 是目前国内外的研究热点和前沿. 我国“十四五”规划中, 将量子通信和量子计算列为国家的重要发展战略. 近些年, 量子通信领域取得了许多优秀的研究成果. 潘建伟院士团队^[1,2]于 2018 年实现了冷原子系统内单集体激发态的相干操纵; 又于 2019 年提出了无需量子存储器的实验量子中继器, 通过操纵 12 光子干涉仪, 将量子纠缠的产生率提高了 89%. 在此基础上, 该团队于 2020 年成功构建了 76 个光子的量子计

算原型机“九章”; 在发展了量子光源受激放大的理论和实验方法后, 又构建了 113 个光子 144 模式的量子计算原型机“九章二号”, 实现了相位可编程功能. 郭光灿院士团队^[3,4]于 2020 年实现了对高维量子态的直接强测量; 2021 年在高阻抗微波谐振腔内, 完成了两个半导体量子比特间的长程耦合, 提出了一种新型谱学方法, 更快速、更直观地表征了量子比特间的耦合关系. 2000 年, 龙桂鲁教授团队^[5]提出了量子安全直接通信 (quantum secure direct communication, QSDC) 方案, 这是一种高安全性的通信模式. 之后, 龙桂鲁教授团队对 QSDC 进行了更深入的研究, 取得了一系列突破性成果.

* 国家自然科学基金 (批准号: 61971348, 61201194)、陕西省国际科技合作与交流计划 (批准号: 2015KW-013) 和陕西省自然科学基金基础研究计划 (批准号: 2021JM-464) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: 2533639692@qq.com

2020年,龙桂鲁教授团队^[6]提出了第一个与设备无关的量子安全直接通信方案;2021年,龙桂鲁教授团队^[7]又使用掩盖编码技术,大幅度增大了量子直接通信的系统容量.

近年来,国际上有关量子通信的研究,也取得了一系列突破性成果.2016年,美国约翰斯霍普金斯大学量子物质研究所物理与天文学系Pan等^[8]对量子自旋冰 $\text{Yb}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ 结构特性进行了研究,发现磁化率的形式与单极气体的形式一致,且可以定义和测量磁单极电导率.2020年,佛罗里达州国家高磁场实验室Pan等^[9]研究了增强射频辐射下量子斯格明子霍尔效应(Hall skyrmions)的稳定性,并讨论了这种稳定性的可能来源.2021年,德国帕德博恩大学光子量子系统研究所Jöns团队^[10]进行了量子芯片层面的研究,通过实验论证了集成光子学与量子技术相结合的可行性,为下一代集成电路的研发开拓了新的思路.2021年,德国马克斯普朗克科学研究所Henke等^[11]搭建了一个用于探索自由电子的量子光学通用平台,实现了集成光子学连续束电子相位调制.

2016年8月16日,中国在酒泉卫星发射中心,成功发射了世界上第一颗量子科学实验卫星“墨子号”^[12];2017年中国在国际上首次实现了千公里级的星地双向量子通信^[13];同年9月,世界首条量子保密通信干线——“京沪干线”正式开通.结合“京沪干线”与“墨子号”量子卫星的天地链路,中国首次实现洲际量子保密通信^[14];2021年,在“京沪干线”与“墨子号”对接的基础上,中国成功组建天地一体化量子通信网络^[15],这些成果标志着中国构建量子通信天地一体化广域网的技术逐渐成熟.

空中通信组网的构建,是当前国防、民用航空、无人机通信等领域的研究前沿^[16–20].但是,迄今为止,国内外对于空中通信组网的研究,仅局限于经典通信领域.对于雁群空中飞行阵列,研究者们取得了一些原创性成果,并被应用于仿生学领域^[21–24].然而,仿雁群阵列量子空中组网构建策略的研究,迄今尚未展开.受到雁群空中飞行阵列的启发,本文将其与量子卫星通信相结合,提出了一种仿雁群 Λ 型量子空中组网拓扑结构,构建了相应通信系统.通过仿真分析误码率、吞吐率和能耗等参数,研究了该组网结构的各项性能.希望通过本文,为量子空中通信组网的研究提供新的思路.

2 仿雁群 Λ 型阵列量子空中组网结构特点

2.1 雁群空中飞行阵列特点

大雁在迁徙过程中,飞行阵列如图1所示,本文称之为“ Λ 型”飞行结构.在 Λ 型阵列中,头雁带领队伍飞行.鸟类行为学研究^[24]表明,大雁在飞行过程中,自身不断地拍打翅膀,产生上升涡流.利用这种涡流,尾随的大雁在飞行过程中会减少自身能量的消耗,每只尾随的大雁均会获得其前方大雁产生的涡流帮助,但头雁没有涡流可用,所以相对于雁群中的其他大雁会消耗更多的能量.在长途迁徙过程中,头雁和尾雁周期性地交换位置,以此来节省飞行的能耗.相关研究表明, Λ 型阵列飞行的大雁,比独自飞行的大雁节省70%的能量^[25].



图1 雁群飞行阵列
Fig. 1. Geese flying array.

2.2 仿雁群量子空中组网

根据雁群飞行阵列,提出仿雁群 Λ 型量子空中组网(simulated wild goose group Λ -type quantum air networking, SWGGA-TQAN),将组网中的各个成员以节点方式呈现,SWGGA-TQAN由量子卫星(quantum satellite)、头节点(head node)和子节点(child node)组成.单头节点SWGGA-TQAN的构建如图2所示.

对于单头节点SWGGA-TQAN,需要考虑当子节点增多时,若无限制的向两边延伸,会使整个拓扑结构变得冗余,且单头节点SWGGA-TQAN通信模型存在严重的安全隐患,即若头节点发生故障,该组网中所有子节点也会故障.以总节点数目21为例,单头节点SWGGA-TQAN模型如图3所示.

基于上述分析可知,单头节点 SWGGA-TQAN 不适用于总节点数目过多的情况,因此提出多头节点 SWGGA-TQAN,组网结构如图 4 所示.

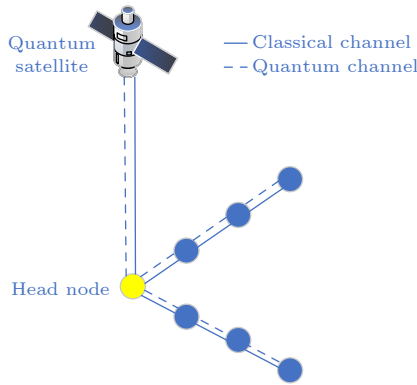


图 2 单头节点 SWGGA-TQAN

Fig. 2. Single-head node SWGGA-TQAN.

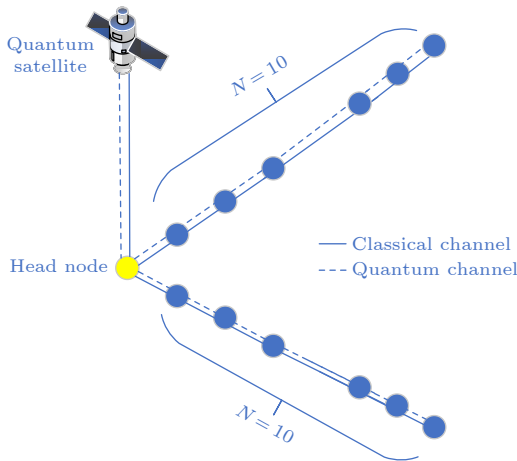


图 3 单头节点 SWGGA-TQAN(总节点数目 21)

Fig. 3. Single-head node SWGGA-TQAN (total number of nodes of 21).

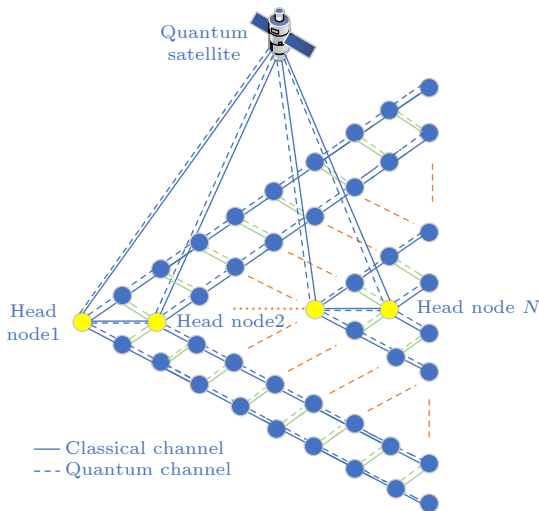


图 4 多头节点 SWGGA-TQAN

Fig. 4. Multi-head node SWGGA-TQAN.

多头节点 SWGGA-TQAN 相较于单头节点 SWGGA-TQAN,结构不再单调,且多个头节点的引入可以保证网络不会轻易陷入瘫痪.多头节点 SWGGA-TQAN 实质上是由多个单头节点 SWGGA-TQAN 组成,可根据不同的总节点数目,建立相应的组网结构,尤其是在总节点数目过多的情况下,比单头节点 SWGGA-TQAN 表现的更加出色.图 4 仅为示意图,每个单头节点 SWGGA-TQAN 的节点数量应根据具体情况及后续分析结合决定.为了便于对比,提出 21 节点下的多头节点 SWGGA-TQAN,如图 5 所示.

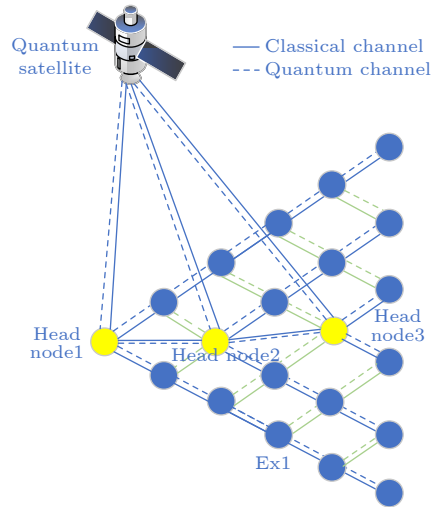


图 5 多头节点 SWGGA-TQAN(总节点数目 21)

Fig. 5. Multi-head node SWGGA-TQAN (total number of nodes of 21).

21 节点下的多头节点 SWGGA-TQAN 模型中共有 3 个单头节点 SWGGA-TQAN,假设头节点 1 所在自身组网为 A,头节点 2 所在自身组网为 B,头节点 3 所在自身组网为 C,A 中共有 11 个节点,B 中共有 7 个节点,C 中共有 3 个节点.正常情况下各头节点会进行通信,除头节点间相互通信外,不会进行与其他组网的任何通信.以 B 为例,如果头节点 2 故障,头节点 1 与头节点 3 在与头节点 2 通信时发现异常情况,根据最短通信距离和子节点数目不宜过多原则,头节点 3 建立与 B 内其余节点的通信.即当某一头节点发生故障,与之通信的相邻组网头节点在发现问题后,可建立与该组网子节点的通信,确保其余节点不会进入失控状态.以 A 中的 Ex1 节点为例,如果该子节点故障,组网头节点 1 发现异常情况,通过头节点间的通信告知相邻头节点 2 异常情况,头节点 2 收到异常情

况后告知头节点 3, 头节点 2 与 A 中脱节的子节点建立通信. 即当某一组网中子节点发生故障, 该组网头节点发现问题后, 告知相邻组网的头节点, 可通过位置调整等方法回到自身所在原组网, 或在新组网中继续通信, 以确保被影响的子节点尽快恢复通信状态.

SWGGA-TQAN 的单头节点与多头节点结构适用于多种空中组网情况, 拥有可扩展性强、保密性高、通信效率高等优点, 为量子空中通信组网的研究提供了新的思路.

2.3 SWGGA-TQAN 抗毁度定量分析

抗毁度是指网络遇到确定性或随机性故障时, 网络维持或恢复一个可接受程度的能力. 对于单头节点 SWGGA-TQAN 通信系统, 其抗毁度较差, 某一子节点故障, 会导致后续子节点的通信均故障, 而头节点的故障会导致整个组网通信系统的故障.

根据相关研究^[26,27], 将多头节点的 SWGGA-TQAN 抗毁度定义为网络效率 E 的变化量, 具体计算公式为

$$\Delta E = |E_1 - E_2|, \quad (1)$$

其中 E_1 和 E_2 分别表示节点故障前和节点故障后组网的网络效率, ΔE 的值越小, 表示网络的性能下降越少, 抗毁度就越高^[27]. 其中, SWGGA-TQAN 网络效率 E 为

$$E(D) = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j} \varepsilon_{ij}(D), \quad (2)$$

式中 N 表示网络中的节点个数; $\varepsilon_{ij}(D) = 1/d_{ij}(D)$, 其中 $d_{ij}(D)$ 表示头节点 i 与子节点 j 的通信距离, 路径唯一, D 表示两节点间的实际距离.

由上述分析过程, 以图 5 的 21 节点 SWGGA-TQAN 为例, 可计算出 E_1 的值. 若此时故障的节点为头节点 2, 结合 2.2 节分析, 可算出此时多头节点 SWGGA-TQAN 结构 E_2 的值, 则此时网络的抗毁度为

$$\Delta E = |E_1 - E_2| = 0.003(D). \quad (3)$$

若此时故障的节点为子节点 E_{x1} , 结合 2.2 节分析, 可得到此时多头节点 SWGGA-TQAN 结构的 E_2 的值, 此时网络的抗毁度为

$$\Delta E = |E_1 - E_2| = 0.003(D). \quad (4)$$

从计算过程可以发现, 对于多头节点 SWGGA-TQAN, 当有其他节点故障时, 不管故障的节点是

头节点还是子节点, 只要组网中仍存在正常通信的头节点, 整个组网依然可以保持通信. 计算结果和分析表明, 多头节点 SWGGA-TQAN 具有良好的抗毁性.

3 SWGGA-TQAN 通信系统构建

3.1 GHZ-EPR 量子卫星-组网隐形传态通信系统

整个网络通信的构建分为卫星与网络和网络与网络两部分, 卫星与网络的通信是由卫星与头节点构成的, 网间的通信是各节点间构成的. 本文将采用量子隐形传态 (quantum teleportation, QT) 技术来构建卫星与网络的通信, 使用 QSDC 技术来构建网间通信.

量子物理系统会随着纠缠粒子数量的增加, 提供更大的存储空间和更强大的并行能力, 因此研究者们一直都希望使用更多的纠缠粒子来进行信息处理. 量子纠缠交换基于没有直接相互作用的纠缠粒子上测量实现^[28], EPR 对是两个量子态纠缠, Greenberger-Horne-Zeilinger (GHZ) 态是 3 个量子纠缠. 纠缠量子比特经常会被用到远程态制备、量子密钥分发等技术的量子信道中, 量子信道相比于经典信道具有更高的安全性. 刘乾和胡占宁^[29]对理论知识进行相关分析, 本文在完善分析的同时, 进行了通信系统的构建及通信过程的叙述.

GHZ 态是一种经典不可分的三量子比特纠缠态, 也是一种最大纠缠态粒子, GHZ 型量子纠缠是一种量子叠加系统, 包含 3 个量子比特. 8 种 GHZ 态粒子如下所示:

$$\begin{aligned} |\varphi_0\rangle &= (1/\sqrt{2})(|000\rangle + |111\rangle)_{123}, \\ |\varphi_1\rangle &= (1/\sqrt{2})(|000\rangle - |111\rangle)_{123}, \\ |\varphi_2\rangle &= (1/\sqrt{2})(|001\rangle + |110\rangle)_{123}, \\ |\varphi_3\rangle &= (1/\sqrt{2})(|001\rangle - |110\rangle)_{123}, \\ |\varphi_4\rangle &= (1/\sqrt{2})(|010\rangle + |101\rangle)_{123}, \\ |\varphi_5\rangle &= (1/\sqrt{2})(|010\rangle - |101\rangle)_{123}, \\ |\varphi_6\rangle &= (1/\sqrt{2})(|011\rangle + |100\rangle)_{123}, \\ |\varphi_7\rangle &= (1/\sqrt{2})(|011\rangle - |100\rangle)_{123}. \end{aligned} \quad (5)$$

在该通信系统中, 通信双方均具有 3 个量子位粒子和一对 Einstein-Podolsky-Rosen (EPR) 纠缠态, 将本地和远程粒子构成两个 GHZ 态粒

子, 构成的 GHZ 态粒子将被用于量子信道. 为了便于对通信系统进行说明, 假设卫星为通信方 Alice, 头节点为通信方 Bob, 则整个通信系统如图 6 所示.

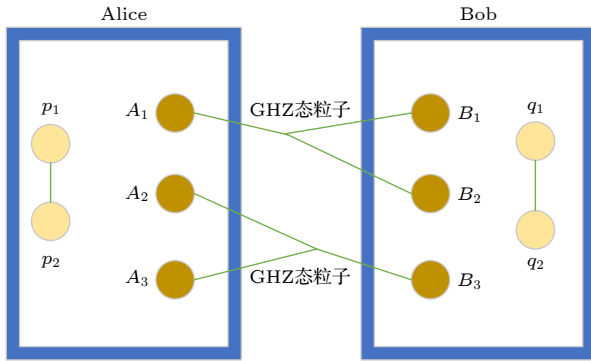


图 6 GHZ-EPR 混合隐形传态系统
Fig. 6. GHZ-EPR hybrid teleportation system.

Alice 拥有 3 个量子位比特 A_1, A_2, A_3 和一对 EPR 纠缠态 $p_1 p_2$, Bob 拥有 3 个量子位比特 B_1, B_2, B_3 和一对 EPR 纠缠态 $q_1 q_2$. 在通信过程中, $A_1 B_1 B_2$ 构成一个 GHZ 态粒子, $A_2 A_3 B_3$ 构成一个 GHZ 态粒子, Alice 的纠缠对粒子 $p_1 p_2$ 和 Bob 的纠缠对粒子 $q_1 q_2$ 进行信息交换. Alice 和 Bob 的纯 EPR 对可以表示为 $|\Phi\rangle_{p_1 p_2} = \alpha_0 |00\rangle + \beta_0 |11\rangle$ 及 $|\Phi\rangle_{q_1 q_2} = \alpha_1 |00\rangle + \beta_1 |11\rangle$, 在该表达式中, 有 $|\alpha_0|^2 + |\beta_0|^2 = 1, |\alpha_1|^2 + |\beta_1|^2 = 1$. GHZ 态粒子与 EPR 纠缠对混合的量子隐形传态系统由 $|Q\rangle_{A_1 B_1 B_2 A_2 A_3 B_3}$, $|\Phi\rangle_{p_1 p_2}, |\Phi\rangle_{q_1 q_2}$ 组成, 表达式如下所示:

$$\begin{aligned} & |\phi\rangle_{A_1 B_1 B_2 A_2 A_3 B_3 p_1 p_2 q_1 q_2} \\ & = |Q\rangle_{A_1 B_1 B_2 A_2 A_3 B_3} \otimes |\Phi\rangle_{p_1 p_2} \otimes |\Phi\rangle_{q_1 q_2}, \quad (6) \end{aligned}$$

式中, $|Q\rangle_{A_1 B_1 B_2 A_2 A_3 B_3} = |\varphi_i\rangle_{A_1 B_1 B_2} \otimes |\varphi_i\rangle_{A_2 A_3 B_3}$, 其中 $|\varphi_i\rangle_{A_1 B_1 B_2}$ 和 $|\varphi_i\rangle_{A_2 A_3 B_3}$ 表示 GHZ 态, $i \in \{0, 1, 2, \dots, 7\}$. 假设 $|\phi\rangle_{A_1 B_1 B_2 A_2 A_3 B_3 p_1 p_2 q_1 q_2}$ 为 $|\phi_0\rangle_{A_1 B_1 B_2 A_2 A_3 B_3 p_1 p_2 q_1 q_2}$ 状态, 对该状态粒子进行 CNOT 操作, 在计算过程中 p_1 与 q_1 作为控制量子位, A_1 与 B_3 作为目标量子位. 系统进行 CNOT 计算后, 状态 $|\phi_0\rangle_{A_1 B_1 B_2 A_2 A_3 B_3 p_1 p_2 q_1 q_2}$ 变为 $|\phi_1\rangle_{A_1 B_1 B_2 A_2 A_3 B_3 p_1 p_2 q_1 q_2}$, $|\phi_1\rangle_{A_1 B_1 B_2 A_2 A_3 B_3 p_1 p_2 q_1 q_2}$ 状态粒子表示如下:

$$\begin{aligned} |\phi_1\rangle_{A_1 B_1 B_2 A_2 A_3 B_3 p_1 p_2 q_1 q_2} & = \frac{1}{2} \left[\left(\sum_{i,j=0}^1 |i, i, i\rangle_{A_1 B_1 B_2} \otimes |j, j, j\rangle_{A_2 A_3 B_3} \right) \otimes (\alpha_0 \alpha_1) |0000\rangle_{p_1 p_2 q_1 q_2} \right. \\ & + \left(\sum_{i,j=0}^1 |i, i, i\rangle_{A_1 B_1 B_2} \otimes |j, j, \bar{j}\rangle_{A_2 A_3 B_3} \right) \otimes (\alpha_0 \beta_1) |0011\rangle_{p_1 p_2 q_1 q_2} \\ & + \left(\sum_{i,j=0}^1 |\bar{i}, i, i\rangle_{A_1 B_1 B_2} \otimes |j, j, j\rangle_{A_2 A_3 B_3} \right) \otimes (\beta_0 \alpha_1) |1100\rangle_{p_1 p_2 q_1 q_2} \\ & \left. + \left(\sum_{i,j=0}^1 |\bar{i}, i, i\rangle_{A_1 B_1 B_2} \otimes |j, j, \bar{j}\rangle_{A_2 A_3 B_3} \right) \otimes (\beta_0 \beta_1) |1111\rangle_{p_1 p_2 q_1 q_2} \right], \quad (7) \end{aligned}$$

该粒子状态进行纠缠变换后得到

$$\begin{aligned} |\phi_1\rangle_{A_1 B_1 B_2 A_2 A_3 B_3 p_1 p_2 q_1 q_2} & = \frac{1}{2} [(|\varphi_0\rangle_{A_1 A_2 A_3} |\varphi_0\rangle_{B_1 B_2 B_3} + |\varphi_1\rangle_{A_1 A_2 A_3} |\varphi_1\rangle_{B_1 B_2 B_3} \\ & + |\varphi_2\rangle_{A_1 A_2 A_3} |\varphi_2\rangle_{B_1 B_2 B_3} + |\varphi_3\rangle_{A_1 A_2 A_3} |\varphi_3\rangle_{B_1 B_2 B_3}) \otimes (\alpha_0 \alpha_1) |0000\rangle_{p_1 p_2 q_1 q_2}] \\ & + \frac{1}{2} [(|\varphi_0\rangle_{A_1 A_2 A_3} |\varphi_6\rangle_{B_1 B_2 B_3} - |\varphi_0\rangle_{A_1 A_2 A_3} |\varphi_7\rangle_{B_1 B_2 B_3} \\ & + |\varphi_2\rangle_{A_1 A_2 A_3} |\varphi_0\rangle_{B_1 B_2 B_3} - |\varphi_2\rangle_{A_1 A_2 A_3} |\varphi_1\rangle_{B_1 B_2 B_3}) \otimes (\alpha_0 \beta_1) |0011\rangle_{p_1 p_2 q_1 q_2}] \\ & + \frac{1}{2} [(|\varphi_2\rangle_{A_1 A_2 A_3} |\varphi_0\rangle_{B_1 B_2 B_3} + |\varphi_3\rangle_{A_1 A_2 A_3} |\varphi_1\rangle_{B_1 B_2 B_3} \\ & + |\varphi_0\rangle_{A_1 A_2 A_3} |\varphi_6\rangle_{B_1 B_2 B_3} + |\varphi_1\rangle_{A_1 A_2 A_3} |\varphi_7\rangle_{B_1 B_2 B_3}) \otimes (\beta_0 \alpha_1) |1100\rangle_{p_1 p_2 q_1 q_2}] \\ & + \frac{1}{2} [(|\varphi_2\rangle_{A_1 A_2 A_3} |\varphi_6\rangle_{B_1 B_2 B_3} - |\varphi_2\rangle_{A_1 A_2 A_3} |\varphi_7\rangle_{B_1 B_2 B_3} \\ & + |\varphi_0\rangle_{A_1 A_2 A_3} |\varphi_0\rangle_{B_1 B_2 B_3} - |\varphi_1\rangle_{A_1 A_2 A_3} |\varphi_1\rangle_{B_1 B_2 B_3}) \otimes (\beta_0 \beta_1) |1111\rangle_{p_1 p_2 q_1 q_2}]. \quad (8) \end{aligned}$$

通信系统的通信过程如下.

步骤 1 通信双方 Alice 和 Bob 按照图 6 所示制备 GHZ 态粒子和 EPR 纠缠对, 进行通信前的准备. 通信系统中 $A_1B_1B_2$ 形成一个 GHZ 态粒子, $A_2A_3B_3$ 形成另外一个 GHZ 态粒子, 两个 GHZ 态粒子与两个 EPR 纠缠对共同构成了该通信系统.

步骤 2 Alice 和 Bob 进行 CNOT 操作, 该过程中 p_1 和 q_1 作为控制量子比特, A_1 和 B_3 作为目标量子比特.

步骤 3 通信双方 Alice 与 Bob 对 A_1, B_3, p_1 和 q_1 进行量子测量, 测量方式为 Alice 在自己侧对 A_1 进行 Z 基测量, 对 p_1 进行 X 基测量, Bob 在自己侧对 B_3 进行 Z 基测量, 对 q_1 进行 X 基测量. 各自测量结束后, 剩余未被进行测量粒子 $B_1, B_2, A_2, A_3, p_2, q_2$ 状态崩塌, 通信双方 Alice 和 Bob 用经典信道相互通知对方测量结果.

步骤 4 在分别接收到对方发送的 p_1 和 q_1 的测量结果后, Alice 和 Bob 分别在 p_2 和 q_2 上进行 X 基测量.

步骤 5 Alice 和 Bob 执行酉操作来进行状态准备, 根据各自在 p_2 和 q_2 上得到的测量结果, 分别对 A_2, A_3, B_1 和 B_2 进行么正变换, 之后 Alice 对 EPR 状态进行重构, Bob 对 EPR 状态进行恢复.

最终得到的结果: p_1 和 p_2 的初始状态表示形式处于 B_1 和 B_2 上, 而 q_1 和 q_2 的初始状态表示形式在 A_2 和 A_3 上.

对于上述第 5 步的操作, 假设在第 3 步结束时, 系统中剩余粒子组成的崩塌状态为

$$\begin{aligned}
 & |Q\rangle_{A_2A_3B_1B_2p_2q_2} \\
 &= \alpha_0\alpha_1|000000\rangle + \alpha_0\beta_1|000111\rangle + \beta_0\alpha_1|111000\rangle \\
 &+ \beta_0\beta_1|111111\rangle_{A_2A_3B_1B_2p_2q_2}, \quad (9)
 \end{aligned}$$

则第 4 步结束时 Alice 的测量值为 $|0\rangle_{A_1}|+\rangle_{p_1}$, Bob 的测量值为 $|0\rangle_{B_3}|+\rangle_{q_1}$.

表 1 双向量子隐形传态协议对比

Table 1. Comparison of two-way quantum teleportation protocols.

协议	传送的量子态	效率/%
文献[31]	单量子态	50
文献[32]	单量子态	40
文献[33]	单量子态	28.5
本方案	纯EPR对	66.7

在计算双向量子隐形传态的效率时, Shima 和 Monireh 等^[30]利用量子信道的传输态, 将协议的效率定义为 $\eta = c/q_c$, 式中 c 表示量子通道传送的量子态数, q_c 表示用于构造量子通道的量子位. 将本方案与一些典型的双向量子隐形传态的效率对比, 如表 1 所列, 可观察到具备良好的通信效率.

3.2 基于 GHZ 态的可认证 QSDC 网间通信系统

QSDC 可以在量子信道中直接安全的传输经典信息, 且通信过程不需要密钥的生成, 无需分配资源进行密钥的管理, 也无需后续的加密和解密过程. 虽然其发展起步较晚, 但是在 20 多年的发展历程中, 衍生出了许多通信协议, 在 2021 年 9 月 30 日, 量子安全直接通信首次实现了 15 个用户间的通信, 传输距离可以达到 40 km^[34]. QSDC 作为量子领域的研究热点, 也产生了许多通信协议^[35–38], 而王明宇等^[39]提出的量子直接传态使 QSDC 应用到量子态的信息传输.

SWGG Λ -TQAN 使用 QSDC 进行通信时, 要考虑窃听和入侵节点等安全问题. 使用基于 GHZ 态的可认证 QSDC 协议进行网间通信, 通信双方可以确认对方的安全性后进行通信. 为了便于对协议进行叙述, 将通信双方定义为 Alice 和 Bob, 在通信开始前, Alice 和 Bob 需要共享长度为 n 的密钥 q 序列, 便于后续双方的身份认证.

步骤 1 Alice 根据自己需要传输的信息 M 制备一串单光子序列和一串 GHZ 态序列. GHZ 态序列中每个粒子为 (5) 式中的一种状态, 每个单光子为 $|0\rangle, |1\rangle, |+\rangle, |-\rangle$ 四种状态之一, 其中 $(|0\rangle, |1\rangle)$ 是一组标准正交基, 称为 Z 基, $(|+\rangle, |-\rangle)$ 是一组标准正交基, 称为 X 基. X 基与 Z 基为非正交基, 且具有如下变换关系:

$$\begin{aligned}
 |0\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}}(|+\rangle + |-\rangle), |1\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|+\rangle - |-\rangle), \\
 |+\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle), |-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle - |1\rangle). \quad (10)
 \end{aligned}$$

步骤 2 Alice 将 GHZ 态序列中的粒子分别抽出构成序列 S_1, S_2 和 S_3 , 随后 Alice 根据密钥 q 序列对序列 S_1 按照如下规则操作:

$q_1 = 0$ 时, 在 S_1 序列中找到第 1 个 $|+\rangle$, 记录其位置 L_1 , 之后当 $q_1 = 1$ 时, 在 S_1 序列中找到第 1 个 $|1\rangle$, 记录器位置 L_1 ;

$q_2 = 0$ 时, 在序列 S_1 中位于 L_1 位置处之后的粒子中, 找到第 1 个 $|+\rangle$, 将该位置标记为 L_2 ; $q_2 = 1$ 时, 采取相同操作将 L_1 后的第 1 个 $|1\rangle$ 的位置标记为 L_2 . 根据上述操作, 标记完所有序列, 得到位置序列 $L(L_1, L_2, \dots, L_n)$.

步骤 3 Alice 在序列 S_1 中随机加入单光子序列得到 S'_1 , 将 S'_1 序列发送给 Bob, 在确认到 Bob 接收到序列后, 公布检测粒子的位置与测量基. Bob 根据 Alice 公布的信息对序列进行 Z 基或 X 基测量, 并将测量后的结果等信息返还给 Alice, Alice 拿到这些信息后, 根据计算结果的错误率判断该通信信道是否安全. 若不安全则放弃此次通信, 若信道安全则进行下一步.

步骤 4 Alice 与 Bob 进行身份认证. Alice 通过无法被修改的经典信道将位置序列 L 公布给 Bob, Bob 使用最开始制备的密钥选择对应的测量基进行测量. 对应位置 L_i 使用 q_i 测量, 并得到最终的测量结果 q' . 如果序列 $q' = q$, 则身份认证成功, 节点并未发生异常, 不相等则说明存在异常, 此时放弃通信.

步骤 5 在验证完信道与通信节点的安全性后, Alice 将序列 S_2 和单光子序列结合得到序列 S'_2 , 将序列 S'_2 发送给 Bob.

步骤 6 Bob 拿到序列 S'_2 后, Alice 公布对应单光子序列位置和测量基信息, Bob 根据 Alice 的信息对序列 S'_2 测量, 根据测量结果分析是否可继续通信.

步骤 7 同第 5 步, Alice 将 S_3 序列和单光子序列结合得到序列 S'_3 , 并将序列 S'_3 发送给 Bob.

步骤 8 Bob 接收到序列 S'_3 后, Alice 公布对应单光子序列位置和测量基信息, Bob 根据 Alice 的信息对序列 S'_3 测量, 分析错误率, 如同第 6 步.

步骤 9 整个通信过程均无问题后, Alice 将原序列所有需要的信息均发送给 Bob, Bob 根据 Alice 发送的消息对序列进行恢复和测量. 最终得到 Alice 需要传输的信息 M .

在该协议中, 定义 (5) 式中的 8 种 GHZ 态粒子形式分别对应 000—111 八种编码. 假设 Alice 要发送编码信息 001, 则在通信开始前, 需要制备的 GHZ 态粒子为 $|\varphi_2\rangle = (1/\sqrt{2})(|001\rangle + |110\rangle)_{123}$, 同时假设用到的单光子为 $|-\rangle$ 和 $|+\rangle$. 则 Alice 抽出每列粒子构成的序列 S_1, S_2 和 S_3 分别为

$$\begin{aligned} S_1 &= \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle)_1, \\ S_2 &= \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle)_2, \\ S_3 &= \frac{1}{\sqrt{2}}(|1\rangle + |0\rangle)_3. \end{aligned} \quad (11)$$

进行位置标记后, 假设 Alice 选取 $|-\rangle$ 随机加入 S_1 序列构成 S'_1 序列, 并发送给 Bob, Bob 同时进行信道安全性测量和身份认证. 由 (10) 式和 (11) 式可得出序列 S'_1 为

$$S'_1 = \frac{1}{2}(|00\rangle + |01\rangle - |10\rangle - |11\rangle). \quad (12)$$

信道确认安全且身份认证通过后, 假设 Alice 选取 $|+\rangle$ 随机加入 S_2 序列构成 S'_2 序列, 发送给 Bob, Bob 接收到序列后, 再进行一次安全验证. 由 (10) 式和 (11) 式可得出序列 S'_2 为

$$S'_2 = \frac{1}{2}(|00\rangle + |01\rangle + |10\rangle + |11\rangle). \quad (13)$$

信道没有安全问题时, Alice 发送 S_3 序列, 假设 Alice 选取 $|-\rangle$ 随机加入 S_3 序列构成 S'_3 序列, 则序列 S'_3 为

$$S'_3 = \frac{1}{2}(|00\rangle + |10\rangle - |01\rangle - |11\rangle). \quad (14)$$

Bob 接收到序列后告知 Alice, Alice 确认无误后, 将原序列中位置等信息经过无法修改的信道传递给 Bob, Bob 对序列进行恢复, 最终得到 Alice 想要发送的编码信息 001.

该通信协议使用 GHZ 态粒子, 给信道提供更高的通信容量, 一个量子态可以存储 4 bit 的信息量. 使用 QSDC 技术后, 虽然该通信协议涉及到了密钥的使用, 增加了资源的消耗, 但是可以有效抵御第三方的截获攻击或重发攻击, 辅助粒子攻击等多种攻击方式. 即使在通信过程中, 某一通信节点发生异常, 通信协议中的身份认证功能可以有效防止该异常节点对 SWGGA-TQAN 造成进一步的破坏.

量子通信协议的效率是根据量子通信效率和量子比特效率衡量的, 量子传输效率^[40] 定义为

$$\zeta_1 = \frac{m_s}{q_u + p_c}, \quad (15)$$

式中 m_s 表示通信过程中传输的信息总量, q_u 表示通信过程中的总量子比特数, p_c 表示通信过程中的总经典比特数. 量子比特效率^[40] 定义为

$$\zeta_2 = \frac{q_c}{q_u}, \quad (16)$$

式中 q_c 为通信过程使用到的量子比特. 网间通信系统中, 为了建立安全的通信信道, 使用了 $n = M$ 个量子比特作为密钥序列, 完成身份认证功能. 当需要传输 $8M$ 个总信息比特时, 使用到的总量子比特数为 $4M$ 个, 使用到的经典比特数为 $3M$ 个, 故该通信系统的量子传输效率为

$$\zeta_1 = \frac{m_s}{q_u + p_c} = \frac{8M}{4M + 3M} = \frac{8}{7} \approx 1.14, \quad (17)$$

量子比特效率为

$$\zeta_2 = \frac{q_c}{q_u} = \frac{4M}{4M} = 1. \quad (18)$$

将经典的 QSDC 方案与网间通信系统方案进行量子传输效率、量子比特效率和编码容量对比分析, 结果如表 2 所列. 可以看出该网间通信系统的量子比特率并列最高, 且由于 GHZ 态粒子的使用, 在保证了高编码容量的同时具备良好的传输效率.

表 2 QSDC 协议参数比较
Table 2. Comparison of QSDC protocol parameters.

协议名称	量子传输效率	量子比特效率	编码容量/ bits
Ping-Pong协议	0.33	0.33	1
Two-Step QSDC协议	1	1	2
单光子的单向QSDC协议 ^[41]	0.5	1	1
Bell态和单光子混合QSDC协议 ^[42]	1	1	1.5
本方案	1.14	1	4

4 性能仿真分析

4.1 SWGGA-TQAN 传输误码率分析

在实际应用中, 环境噪声、人为干扰等因素都会影响通信性能, 产生通信问题. 针对 SWGGA-TQAN, 设量子信息传输误码率为 P_r ^[43], 则在本文中网间误码率 P_r 的计算公式为

$$P_r = \frac{L^2 n_L^2 \lambda^2 \sigma^2}{f_T^2 f_R^2 (n+1)^2 F_T F_R (1-L_p)}, \quad (19)$$

式中, σ 表示噪声平均功率谱密度, n 表示头节点的个数, n_L 表示对应传输距离的子节点个数, L 表示网间信息传输距离, λ 为光子波长, f_T 表示发送端孔径, f_R 表示接收端孔径, F_T 表示发射端传输因子, F_R 表示接收端传输因子, L_p 链路损耗.

根据相关分析^[44], 当选择 $\lambda = 1550$ nm 的光波长时, 可以削减自然大气环境对传输链路的衰减. 分析单组网情况 ($n = 1$) 误码率 P_r 和网间信息传输距离 L 间的关系, 在传输距离为 L 时, 有 2 个子节点 ($n_L = 2$), 误码率公式中的其他变量设置为 $f_T = f_R = 35$ mm, $F_T = F_R = 1$, $L_p = 5\%$, 噪声平均功率谱密度 σ^2 分别设置为 1, 2 和 3 dB/m.

如图 7 所示, σ^2 一定时, 头节点与子节点的通信距离越远, 网间量子误码率越大. 在 $\sigma^2 = 1$ dB/m 环境下, 网间通信距离由 300 m 增大到 800 m 时, 误码率由 0.026 增大到 0.187. 当头节点与子节点的通信距离固定时, 随着 σ^2 增大, 网间量子误码率也会增大. 在头节点与子节点的传输距离为 700 m 条件下, $\sigma^2 = 1$ dB/m 时, 误码率为 0.143; $\sigma^2 = 3$ dB/m 时, 误码率为 0.43.

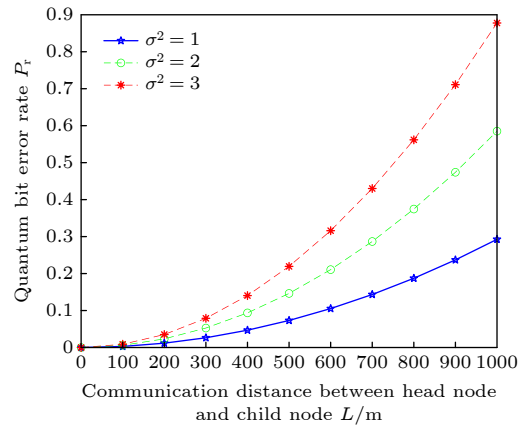


图 7 头节点和子节点间通信距离与误码率的关系
Fig. 7. Relationship between bit error rate and communication distance between head node and child node.

除了上述趋势, 当网间通信距离在 400 m 内, 随着通信距离的增大, 误码率增长的幅度不大. 以 $\sigma^2 = 2$ dB/m 环境为例, 当通信距离在 0—400 m 范围内, 误码率由 0 增长到 0.094, 但当最远通信距离大于 400 m, 由 400 m 增大到 1000 m 时, 误码率由 0.094 增大到 0.585, $\sigma^2 = 1$ dB/m 与 $\sigma^2 = 3$ dB/m 环境下也是同样的趋势. 综上所述, 若头节点与子节点的通信范围在 0—400 m 内, 误码率的提升缓慢; 当通信距离大于 400 m 时, 误码率的提升较快, 将 400 m 定义为“网间敏感距离”.

对于单头节点 SWGGA-TQAN, 增加子节点时, 只能向两侧延伸, 头节点与子节点的通信距离一旦超过“网间敏感距离”, 误码率的较快增长会使网络通信质量受到很大影响. 对于多头节点 SWG

GA-TQAN, 即类似于图 4 的拓扑结构, 总节点个数相同时, 该结构会存在多个单头节点 SWGGA-TQAN, 对于每一个单头节点 SWGGA-TQAN, 头节点与最远子节点的通信距离超过“网间敏感距离”的可能性更低, 此时误码率对网络通信质量影响较小.

4.2 SWGGA-TQAN 能耗分析

SWGGA-TQAN 中每个节点的能耗均为两部分, 即飞行能耗和通信能耗, 假设 SWGGA-TQAN 存在 N 个节点, 以持续时间 T 为一个周期. 在该周期内, 每个节点的运动情况分为移动或悬停. 设悬停时的功率为 P_s , 移动时的功率为 P_m , 移动时的速度为 v , 由于速度加速至 v 或减速过程至 0 的时间极短, 可忽略. 设在 T 内有 t_1 时间内节点在运动, 则其位移能耗 E_m 为

$$E_m = P_m \times t_1 \times N, \quad (20)$$

则节点在 T 内有 $T - t_1$ 时间处于悬停状态, 节点的悬停能耗 E_s 为

$$E_s = P_s \times (T - t_1) \times N. \quad (21)$$

卫星与头节点每次通信过程中, 定义头节点接收单位数据量功率为 P_a ; 在网内通信中, 定义节点需要接收或传输单位数据量的功率为 P_b . 头节点需要完成与卫星及两个子节点的通信, 若头节点数目为 N_f , 则头节点的通信能耗 E_f 为

$$E_f = [P_a + (P_b \times 2)] \times N_f \times T, \quad (22)$$

子节点每次通信均需要一次接收与一次传输, 则总体子节点的通信能耗 E_c 表示为

$$E_c = P_b \times 2 \times T \times (N - N_f). \quad (23)$$

因此, 整个组网在时间 T 内的总能耗为

$$E_t = E_m + E_s + E_f + E_c. \quad (24)$$

基于上述分析, 给定悬停功率 P_s 为 2 W, 移动功率 P_m 为 4 W, 头节点与卫星通信的数据功率 P_a 为 5 W, 网间通信功率 P_b 为 3 W, 每个持续时间 T 内均有 80% 的时间在运动, 即 $t = 0.8T$.

以 21 节点为例, 针对多头节点 SWGGA-TQAN、单头节点 SWGGA-TQAN 和节点不构成 SWGGA-TQAN 这 3 种结构, 分析各自能耗. 多头节点 SWGGA-TQAN 共有 3 个头节点, 18 个子节点; 单头节点 SWGGA-TQAN 有 1 个头节点和 20 个子节点; 不构成 SWGGA-TQAN 时, 节点间没有联系, 为

21 个头节点.

图 8 是 3 种结构随时间的总能耗变化. 显然, 3 种结构的能耗均随时间增大, 且无组网结构的总能耗远大于 SWGGA-TQAN 结构的总能耗. 当 T 为 4 h, 无组网结构的总能量消耗为 1226 J, 单头节点 SWGGA-TQAN 的总能量消耗为 826.4 J, 多头节点 SWGGA-TQAN 的总能量消耗为 866.4 J; 当 T 为 9 h, 无组网结构的总能量消耗为 2759 J, 单头节点 SWGGA-TQAN 的总能量消耗为 1859 J, 多头节点 SWGGA-TQAN 的总能量消耗为 1949 J. 针对于单头节点 SWGGA-TQAN 和多节点 SWGGA-TQAN, 在相同总节点数的情况下, 将一些子节点变为头节点, 多头节点 SWGGA-TQAN 的能耗更大是正常现象. 但相同时间内增大的能耗不到 5%, 考虑到误码率等其他属性的优势, 该能耗是可以被接受的.

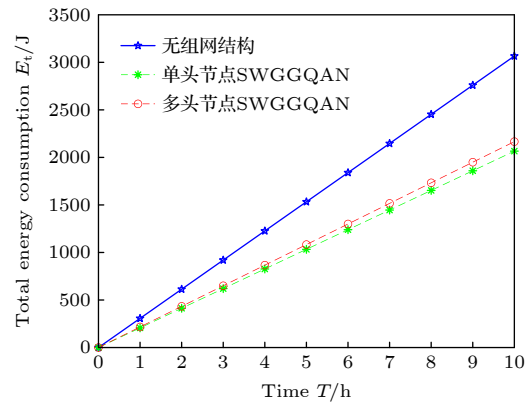


图 8 总能耗随时间变化

Fig. 8. Variation of total energy consumption with time.

取上述参数时, 单头节点 SWGGA-TQAN 相较于无组网结构的能量节省为 32.6%, 多头节点 SWGGA-TQAN 相较于无组网结构的能量节省为 29.3%. 考虑到实际自由空间中, 公式中各参数值会比该仿真条件下参数值更大, 可以预见到 SWGGA-TQAN 在能量节省方面拥有优秀的性能, 即具备雁群阵列的优势.

4.3 SWGGA-TQAN 吞吐率分析

在 SWGGA-TQAN 中, 设成功制备 GHZ 态序列和单光子序列的概率为 P_1 , 通信双方认证成功概率为 P_2 , 子节点成功收到量子信息的概率为 P_3 , 那么成功将一个量子态信息传输至第一个子节点的概率为

$$P = P_1 \times P_2 \times P_3. \quad (25)$$

若 SWGGA-TQAN 中每一侧有 Y 个子节点, 则对于某一侧最后一个子节点, 成功收到量子态信息的概率为

$$P = (P_1 \times P_2 \times P_3)^Y. \quad (26)$$

在头节点与第一个子节点的通信过程中, 制备 GHZ 态序列和单光子序列的时间为 C_1 , 双方进行身份认证的时间为 C_2 , 量子信息通过信道的传输时间为 C_3 . 因此, 成功将信息传输至第 1 个子节点的时间为

$$C = C_1 + C_2 + C_3. \quad (27)$$

若 SWGGA-TQAN 中每一侧有 Y 个子节点, 则对于某一侧最后一个子节点, 成功收到信息时所需要的时间为

$$C = (C_1 + C_2 + C_3) \times Y, \quad (28)$$

则对于 SWGGA-TQAN, 吞吐率可以定义为

$$Q = \frac{P}{C} = \frac{(P_1 \times P_2 \times P_3)^Y}{(C_1 + C_2 + C_3) \times Y}. \quad (29)$$

考虑到节点间的通信与身份认证均在信道, 以及在自由空间传输时不同因素的干扰, 则 C_1 和 C_2 相比于 C_3 很小, 可以忽略不计, 所以

$$Q = \frac{P}{C} = \frac{(P_1 \times P_2 \times P_3)^Y}{C_3 \times Y}. \quad (30)$$

根据文献 [45] 可知, 自由空间理想条件下的通信概率可以达到 0.95, 所以取 P_1, P_2, P_3 的值均为 0.95. 自由空间存在噪声等多种影响因素, 会使传输时延不同程度的减慢, 仍以噪声平均功率谱密度 σ^2 分别为 1, 2 和 3 dB/m 情况下讨论, 设 σ^2 分别为 1 dB/m 情况下的传输时延为 $1 \mu\text{s}$, 2 dB/m 下的时延为 $1.5 \mu\text{s}$, 3 dB/m 下的时延为 $2 \mu\text{s}$.

如图 9 所示, 吞吐率随着噪声功率谱密度的增大而减小, 当单侧子节点数目为 3 时, 在噪声功率谱密度为 $\sigma^2 = 1$ dB/m 的自由空间, 单头节点 SWGGA-TQAN 的吞吐率为 245 kb/s, 在噪声功率谱密度为 $\sigma^2 = 3$ dB/m 的自由空间, 单头节点 SWGGA-TQAN 的吞吐率为 122.5 kb/s. 在噪声功率谱密度一定的情况下, 随着单侧子节点数目的增多, 单头节点 SWGGA-TQAN 的吞吐率降低. 在 $\sigma^2 = 2$ dB/m 的自由空间中, 当单侧子节点数由 2 增加到 7 时, 吞吐率由 110.6 kb/s 下降到 46.45 kb/s.

根据上述分析, 发现单头节点 SWGGA-TQAN 的单侧子节点数目为 10, 即整体组网数量为 21 时,

构成如图 3 所示的结构, 在 $\sigma^2 = 2$ dB/m 的自由空间中, 组网的吞吐率只有 23.9 kb/s, 但若构成图 5 所示的多头节点 SWGGA-TQAN, 总节点数目仍为 21, 此时 3 个单头节点 SWGGA-TQAN 的吞吐率分别为 79.83, 163.4 和 601.7 kb/s.

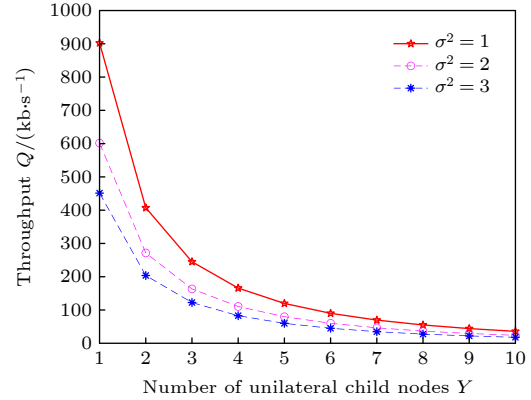


图 9 单头节点 SWGGA-TQAN 中吞吐率与单侧子节点数目的关系

Fig. 9. Relationship between throughput and the number of single side child nodes in single-head node SWGGA-TQAN.

考虑到组网中节点数量大多情况下不会太少, 故多头节点 SWGGA-TQAN 更加适用, 保证每个单头节点 SWGGA-TQAN 的吞吐率不会太低. 综上所述, 应根据组网需求的总节点数目, 选择构建单头节点 SWGGA-TQAN 或多头节点 SWGGA-TQAN, 保证量子组网的吞吐率尽可能大.

5 结 论

本文基于雁群空中飞行阵列的特点, 提出了基于雁群阵列的量子空中组网构建策略, 对该组网构建的可行性进行了理论研究, 提出了组网与卫星、网间的两种通信系统, 并对其性能进行了分析. 仿真结果表明, SWGGA-TQAN 的构建在理论上是可行的, 且总节点数目过多时, 多头节点 SWGGA-TQAN 具备更好的性能. 针对不同总节点数, SWGGA-TQAN 可以构建不同的拓扑结构, 具有较强的适应性. 仿雁群阵列量子空中组网的构建策略为量子通信及空中组网领域的研究提供了新的方向, 同时也为后续对该组网的其他研究奠定了理基础.

参考文献

- [1] An Z Y, Wang X J, Yuan Z S, Bao X H, Pan J W 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 224203 (in Chinese) [安子焯, 王旭杰, 苑震生, 包小辉, 潘建伟 2018 *物理学报* **67** 224203]

- [2] Pan J W, Chen Y A, Xu F H, Li Z D, Zhang R, Yin X F, Liu L Z, Hu Y, Fang Y Q, Fei Y Y, Jiang X, Zhang J, Li L, Liu N L 2019 *Nat. Photonics* **13** 644
- [3] Zhang C R, Hu M J, Xiang G Y, Zhang Y S, Li C F, Guo G C 2020 *Chin. Phys. Lett.* **37** 080301
- [4] Wang B C, Lin T, Li H O, Gu S S, Chen M B, Guo G C, Jiang H W, Hu X D, Cao G, Guo G P 2021 *Sci. Bull.* **66** 332
- [5] Long G L, Liu X S 2000 arXiv: quant-ph/0012056
- [6] Zhou L, Sheng Y B, Long G L 2020 *Sci. Bull.* **65** 12
- [7] Long G L, Zhang H R 2021 *Sci. Bull.* **66** 1267
- [8] Pan L D, Laurita N J, Ross K A, Gaulin B D, Armitage N P 2016 *Nature Phys.* **12** 361
- [9] Pan W, Reno J L, Reyes A P 2020 *Sci. Rep.* **10** 7659
- [10] Pelucchi E, Fagas G, Aharonovich I, Englund D, Figueroa E, Gong Q H, Hannes H, Liu J, Lu C Y, Matsuda N, Pan J W, Schreck F, Sciarrino F, Silberhorn C, Wang J W, Jöns K D 2021 *Nat. Rev. Phys.* **4** 194
- [11] Henke J W, Raja A S, Feist A, Huang G H, Arend G, Yang Y J, Kappert F J, Wang R N, Möller M, Pan J H, Liu J Q, Kfir O, Claus R, Kippenberg T J 2021 *Nature* **600** 653
- [12] Gao B 2016-08-16 (001) *Quantum Science Experiment Satellite "Mozi" Launched* (Science and Technology Daily) (in Chinese) [高博 2016-08-16 (001) “墨子号”量子科学实验卫星发射升空 (科技日报)]
- [13] Latest Achievements of Quantum Science Experiment Satellite “Mozi” 2017 *Optical Commun. Technol.* **41** 8 (in Chinese) [“墨子号”最新成果 2017 光通信技术 **41** 8]
- [14] World's First Secure Quantum Communication Line in China—Beijing-Shanghai trunk line 2017 *Tianjin Economy* **10** 57 (in Chinese) [世界首条量子保密通信干线——“京沪干线”开通 2017 天津经济 **10** 57]
- [15] Realization of the Integrated Space-to-ground Quantum Communication Network in China 2021 *Metrology & Measurement Technlque* **48** 104 (in Chinese) [我国成功组建天地一体化量子通信网络 2021 计量与测试技术 **48** 104]
- [16] Xiong X 2021 *Electron. Tech.* **50** 32 (in Chinese) [熊欣 2021 电子技术 **50** 32]
- [17] Zhong J F, Wang H J 2020 *Telecommun. Eng.* **60** 1290 (in Chinese) [钟剑峰, 王红军 2020 电讯技术 **60** 1290]
- [18] Li H B, Tang X G, Zhou S H, Wu S G, Wang M Y 2022 *Net. Secur. Technol. Appl.* **1** 3 (in Chinese) [李海滨, 唐晓刚, 周尚辉, 吴曙光, 王梦阳 2022 网络安全技术与应用 **1** 3]
- [19] Xu Z Q 2020 *GNSS World of China* **45** 76 (in Chinese) [许志强 2020 全球定位系统 **45** 76]
- [20] Zhao B Y, Ji W F, Weng J, Sun Y, Li Y Q, Wu X 2021 *J. Frontiers Comput. Sci. Technol.* **15** 2304 (in Chinese) [赵蓓英, 姬伟峰, 翁江, 孙岩, 李映岐, 吴玄 2021 计算机科学与探索 **15** 2304]
- [21] Yin Z 2022 *Ph. D. Dissertation* (Beijing: University of Science & Technology Beijing) (in Chinese) [尹墨 2022 博士学位论文 (北京: 北京科技大学)]
- [22] Zhou L, Wang M S, Dai J S 2019 *Ordnance Industry Automation* **38** 88 (in Chinese) [周良, 王茂森, 戴劲松 2019 兵工自动化 **38** 88]
- [23] Yin Z, He W, Zou Y, Mu X X, Sun C Y 2021 *Acta Automatica Sin.* **47** 1355 (in Chinese) [尹墨, 贺威, 邹尧, 穆新星, 孙长银 2021 自动化学报 **47** 1355]
- [24] Peng J S, Fu X J 2021 *Control Engineering of China* DOI: 10.14107/j.cnki.kzgc.20200927 (in Chinese) [彭建帅, 付兴建 2021 控制工程 DOI: 10.14107/j.cnki.kzgc.20200927]
- [25] Speakman J R, Banks D 1998 *IBIS* **140** 280
- [26] Song S Z 2014 *M. S. Thesis* (Tianjin: Civil Aviation University of China) (in Chinese) [宋素珍 2014 硕士学位论文 (天津: 中国民航大学)]
- [27] Ran H D, Li J H, Cui Q, Nan M L 2019 *Fire Control Command Control* **44** 55 (in Chinese) [冉洪丹, 李建华, 崔琼, 南明莉 2019 火力与指挥控制 **44** 55]
- [28] Du Z L, Li X L 2019 *Quantum Inf. Process.* **18** 226
- [29] Liu Q, Hu Z N 2017 *J. Atom. Mol. Phys.* **34** 915 (in Chinese) [刘乾, 胡占宁 2017 原子与分子物理学报 **34** 915]
- [30] Shima H, Monireh H 2015 *Quantum Inf. Process.* **14** 739
- [31] Fu H Z, Tian X L, Hu Y 2014 *Int. J. Theo. Phys.* **53** 1840
- [32] Chen Y 2014 *Int. J. Theo. Phys.* **53** 1454
- [33] Duan Y J, Zha X W, Sun X M, Xia J F 2014 *Int. J. Theo. Phys.* **53** 2697
- [34] Zhang Y 2021-09-30(005) *Realization of Quantum Secure Direct Communication over 100 km Fiber* (Science and Technology Daily) (in Chinese) [张晔 2021-09-30(005) 量子安全直接通信传输距离达 40 公里 (科技日报)]
- [35] Yu S, Bai M Q, Tang Q, Mo Z W 2021 *Chin. J. Quant. Elect.* **38** 57 (in Chinese) [余松, 柏明强, 唐茜, 莫智文 2021 量子电子学报 **38** 57]
- [36] Zheng T, Zhang S B, Sun Y H, Chang Y 2020 *Application Research of Computers* **37** 2144 (in Chinese) [郑涛, 张仕斌, 孙裕华, 昌燕 2020 计算机应用研究 **37** 2144]
- [37] Zhang M L, Liu Y H, Nie M 2018 *Chin. J. Quant. Elect.* **35** 320 (in Chinese) [张美玲, 刘原华, 聂敏 2018 量子电子学报 **35** 320]
- [38] Liu Z H, Chen H W 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 130304 (in Chinese) [刘志昊, 陈汉武 2017 物理学报 **66** 130304]
- [39] Wang M Y, Wang X D, Ruan D, Long G L 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 190301 (in Chinese) [王明宇, 王馨德, 阮东, 龙桂鲁 2021 物理学报 **70** 190301]
- [40] Zhou X T, Jiang Y H, Guo C F, Zhao N, Liu B 2021 *Chin. J. Quant. Elect.* <https://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1163.TN.20210927.2021.002.html> (in Chinese) [周贤韬, 江英华, 郭晨飞, 赵宁, 刘彪 2021 量子电子学报 <https://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1163.TN.20210927.2021.002.html>]
- [41] Quan D X, Pei C X, Liu D, Zhao N 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 2493 (in Chinese) [权东晓, 裴昌幸, 刘丹, 赵楠 2010 物理学报 **59** 2493]
- [42] Cao Z W, Zhao G, Zhang S H, Feng X Y, Peng J Y 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 230301 (in Chinese) [曹正文, 赵光, 张爽浩, 冯晓毅, 彭进业 2016 物理学报 **65** 230301]
- [43] Nie M, Han K J, Yang G, Zhang M L, Sun A J, Pei C X 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 140303 (in Chinese) [聂敏, 韩凯捷, 杨光, 张美玲, 孙爱晶, 裴昌幸 2021 物理学报 **70** 140303]
- [44] Zhu Y, Shi L, Wei J H, Zhu Q L, Yang R, Zhao G H 2019 *Laser Optoelect. Prog.* **56** 232 (in Chinese) [朱宇, 石磊, 魏家华, 朱秋立, 杨汝, 赵顾颢 2019 激光与光电子学进展 **56** 232]
- [45] Nie M, Wei R Y, Yang G, Zhang M L, Sun A J, Pei C X 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 110301 (in Chinese) [聂敏, 卫容宇, 杨光, 张美玲, 孙爱晶, 裴昌幸 2019 物理学报 **68** 110301]

Construction strategy of quantum air communication network of imitation goose swarm array*

Yao Ming-Hui^{1)†} Nie Min¹⁾ Yang Guang¹⁾ Zhang Mei-Ling¹⁾
Sun Ai-Jing¹⁾ Pei Chang-Xing²⁾

1) (*School of Communication and Information Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunication, Xi'an 710121, China*)

2) (*State Key Laboratory of Integrated Service Networks, Xi'an University of Electronic Science and Technology, Xi'an 710071, China*)

(Received 21 January 2022; revised manuscript received 26 March 2022)

Abstract

Quantum satellite communication is a research hotspot in the field of quantum communication, which has the characteristics of wide coverage, high communication efficiency and strong security. The construction strategy of the quantum communication network is an essential part of quantum communication. However, the construction strategy of quantum air communication network has not been studied yet so far. In this paper, according to the characteristics of flying goose array and principle of bionics, a simulated wild goose group Λ quantum air communication network topology is proposed, which can be divided into single-head node Λ type and multi-head node Λ type. Based on Greenberger-Horne-Zeilinger (GHZ) state particles, a certifiable QSDC inter-network communication system and a GHZ-EPR quantum teleportation communication system are established. The bit error rate, energy consumption, throughput, and other parameters are studied. After theoretical analysis and experimental measurement, for the single-head node Λ network structure in the environment where the average power spectral density of noise is 2 dB/m, when the communication distance between the head node and the child node is less than 400 m, the bit error rate is less than 0.094; if the communication distance increases from 400 m to 1000 m, the bit error rate increases rapidly, reaching 0.585; when the number of child nodes on one side increases from 2 to 7, the throughput decreases from 110.6 kb/s to 46.45 kb/s. For example, when the total number of nodes is 21, the single-head node Λ network structure saves 32.6% energy but reduces the throughput to 23.9 kb/s. By comparison, the multi-head node Λ network structure with 21 nodes saves 29.3% energy and achieves throughput of 163.4 kb/s. The above studies show that the quantum air network with the structure of imitation goose group array has good network scalability, excellent information security and flexible network structure.

Keywords: Λ -type network structure of imitation wild goose group, quantum air communication network, energy consumption analysis, Greenberger-Horne-Zeilinger state

PACS: 03.67.Hk, 03.67.Ac

DOI: [10.7498/aps.71.20220158](https://doi.org/10.7498/aps.71.20220158)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61971348, 61201194), the International Scientific and Technological Cooperation and Exchange Program in Shaanxi Province, China (Grant No. 2015 KW-013), and the Natural Science Basic Research Program of Shaanxi Province, China (Grant No. 2021JM-464).

† Corresponding author. E-mail: 2533639692@qq.com