

天基信息港对等共享网络性能仿真

宋唐益嘉¹, 胡鹤飞¹, 张思睿¹, 许凌毅², 辛 宁³

(1. 北京邮电大学信息与通信工程学院, 北京 100876; 2. 北京邮电大学电子工程学院, 北京 100876;
3. 中国空间技术研究院通信与导航卫星总体部, 北京 100094)

摘要: 由于空间设备资源扩展能力和物理环境的限制造成天基信息港网络丢包率与时延较高, 无法满足高性能信息任务处理需求. 本文对对等共享网络的集中式和结构化分布式网络结构模型进行具体研究, 共提出了四种天基信息港对等共享网络模型方案. 基于PeerSim仿真平台对所提出的结构化分布式对等网络搭建了仿真平台, 研究关键参数对网络性能的影响. 结果表明, 对于节点移动性强的大型卫星网络, 天基信息港结构化分布式双层对等网络相较于单层网络不仅时延减少近90%, 并能够保证查找成功率达到98%以上. 通过仿真验证了我们所提方案的合理性, 具备提高天基信息港信息处理能力的优势.

关键词: 天基信息港; 卫星通信; 对等网络; 结构化网络; Kademia协议; PeerSim仿真平台

中图分类号: TN927 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2022)05-1266-04

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20210423

Performance Simulation of P2P Network in Space-Based Information Port

SONG Tang-yi-jia¹, HU He-fei¹, ZHANG Si-rui¹, XU Ling-yi², XIN Ning³

(1. School of Information and Communication Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China;
2. School of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China;
3. Communications and Navigation Satellite General Department, China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: Due to the limitation of space equipment resource expansion ability and physical environment, making the packet loss rate and delay high, so the space-based information port cannot meet the requirements of high-performance information task processing. This paper studies the centralized and structured distributed network structure models of P2P (Peer to Peer) sharing network, and puts forward four P2P sharing network model schemes. Based on PeerSim simulation platform, a simulation platform is built for the proposed structured distributed peer-to-peer network, and the influence of key parameters on network performance is studied. The results show that for large satellite networks with strong node mobility, compared with the single layer network, the structured distributes two-layer P2P network of the space-based information port can not only reduce the time delay by nearly 90%, but also ensure that the success rate of the search can reach more than 98%. The simulation results verify the rationality of the proposed scheme, which can improve the information processing ability of the space-based information port.

Key words: space-based information port; satellite communications; peer-to-peer network; structured network; Kademia protocol; PeerSim simulation platform

1 引言

随着航天技术的发展,为了弥补现有卫星网络在多域融合和数据资源处理方面的不足,天基信息网这一概念应运而生. 天基信息网络通过建设以高通量天基通信网络为骨架,融合导航、遥感数据服务的集成天基信息网络,实现了“天网”与“地网”的深度耦合^[1]. 针对天基信息高实时、多样化、体系化应用需求,提出了

一种具备强大的信息处理和服务能力的天基信息港^[2]. 但随着空间工作种类与数目的增加,天基信息港的工作能力进一步受到了挑战.

针对天基信息港的高性能信息处理任务,我们考虑将P2P技术与天基信息港结合. P2P技术因其特殊的网络结构提高了终端计算机资源利用率,在计算机领域(尤其是文件共享领域)得到了广泛地运用^[3]. 与传统的地基网络相比,卫星通信网络组成复杂,拓扑的时

变性更强;由于通信距离较远,通信时延与时延抖动更高,链路质量更差^[4]. 在具体的设计过程中,我们结合了天基网络信息体系的特点,通过分析应用于天基信息港的集中式和结构化分布式网络结构模型,设计了符合天基信息港的配置参数并搭建仿真平台;同时对单层或双层卫星结构进行设计分析,得到不同模型的仿真结论,验证了设计的合理性与优势.

2 天基信息港对等共享网络架构模型

2.1 集中式对等网络模型

2.1.1 单层卫星网络

该模型网络包括两个部分:高轨天基信息港和地面用户网络. 由于传输时延和载荷限制,天基信息港作为数据中心,在对等网络中负责存储所有数据文件索引. 地面用户网络由地面多用户组成 P2P 网络. 用户节点通过提交检索的请求由相关信息的节点回应请求,按照路由机制路由到本地相关的内容,以对等的形式通过高轨天基信息港转发传送到请求节点上. 传统资源定位机制基于泛洪算法,假设网络拓扑图中结点平均邻居节点数为 b ,消息的生存时间为 T ,则采用泛洪定位算法进行一次文件定位请求产生的消息数为 $\sum_{i=1}^T b_i$. 数据获取流程如下:

(1) 数据资源发布流程

天基信息港或地面用户制作数据种子文件,并将种子文件存储到天基信息港目录中.

(2) 数据请求与传输流程

地面用户发出请求后,由天基信息港获取所需资源定位信息,再由资源节点进行数据下发. 该流程高轨天基信息港只执行数据转发功能,空间复杂度为 $O(1)$. 高轨天基信息港和卫星的距离为 L ,则资源定位延迟 $D = 2L$.

2.1.2 双层卫星网络

该网络结构分为三个部分:高轨天基信息港、低轨卫星和地面用户网络. 在 3GPP 所提出的 5G 星地融合方案场景设定中,由于传输时延和资源限制,低轨道卫星在天地一体化系统中主要承担转发和动态场景通信功能^[5],所以我们引入了低轨卫星层进行协同传输.

获取文件过程与单层网络相比,主要是第二步中不需要经过天基信息港,低轨卫星直接执行数据转发功能来减少数据传输时延. 因此该网络模型中,空间复杂度和定位延迟与单层卫星网络一致.

2.2 结构化分布式对等网络模型

与集中式对等网络不同,结构化的对等网络中,没有中心服务器提供集中的信息检索和索引,解决了集中式网络中单点故障,性能较低的问题. 同时 DHT 分

布式哈希表技术的应用也克服了非结构化对等网络中,洪泛查找效率低下的缺点. 目前主要考虑使用 Kademia 协议实现天基信息港对等共享网络^[6].

2.2.1 单层卫星网络

在结构化的天基信息港对等网络中,天基信息港与地面用户共同组成对等网络,除初始数据发布以及数据转发外,与其余对等节点执行相同功能.

(1) 路由表构建

在 Kademia 协议中通过哈希算法对节点的 IP 地址、资源得到 m 个 k 桶作为节点对应的路由表^[7].

(2) 数据获取流程

(a) 天基信息港按照 Kademia 协议在网络中寻找保存资源信息的节点.

(b) 根据数据的 key 值,网络对节点进行迭代查找操作,找到目标资源后由天基信息港进行数据传输.

(c) 若地面用户节点中无法找到数据,向天基信息港请求数据.

(3) 复杂度分析

根据构建的二叉树,在有 n 个节点的网络中,每个节点需存储 $O(\log n)$ 个其他节点,空间复杂度为 $O(\log n)$. 节点资源定位使用二分查找法,因此资源定位的时间复杂度为 $O(\log n)$.

2.2.2 双层卫星网络

与单层卫星结构化对等网络不同,结构化的双层卫星系统对等共享网络中,天基信息港只执行资源发布功能,低轨卫星节点与地面用户共同组成对等共享网络.

与单层卫星网络相比,双层卫星网络在资源查找阶段由低轨卫星对天基信息港下发的资源信息进行搜索. 由于低轨卫星可以实现全球的高密度覆盖,所以加入低轨卫星节点后可以提高请求响应速度,扩大用户覆盖范围. 从复杂度来分析,节点资源定位的时间复杂度和空间复杂度不变.

总的来说,天基信息港集中式对等网络继承了中心化结构的缺点,依赖于中心服务器,可拓展性较差;而结构化分布式对等网络中节点地位是平等的,频繁地进出对网络性能影响更低,并且通过哈希算法更支持精确匹配查询. 因此,下一节我们针对天基信息港结构化分布式对等网络进行具体仿真分析.

3 性能仿真测试

针对上述网络模型中的结构化分布式对等网络,我们利用 Java 实现并基于 PeerSim 组件技术^[9,10]开发了 Space-based PeerSim 仿真平台,网络层主要由 Kademia 协议、随机均匀和不可靠传输协议通过链路层传至节点. 我们选用 WireWS 网络模型^[10],为了体现低轨卫星

网络与地面用户之间的联系,设置beta值为0.15.

3.1 单层与双层结构化分布式对等网络性能比较

K值是Kademlia协议中的关键参数之一,表示记录的k个节点信息.由图1可知,网络平均时延在不同的网络层次下有近10倍的数值差距.结构化分布式的P2P双层网络在传输时延方面明显优于单层网络.

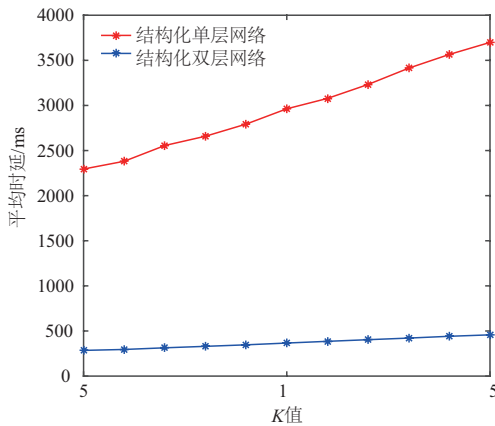


图1 不同网络传输时延随K值的变化趋势

通过图2可知,单层网络查找成功率较双层网络更优.但随着资源数R增加,两者的性能差异逐渐减少.在有较大资源数(大于5)的情况下,并行查找数ALPHA大于5时单双层网络的差异几乎可以忽略,查找成功率可保持在98%以上.因此相较于少资源的场景,双层卫星网络更适用于多用户、多资源的大规模场景中.

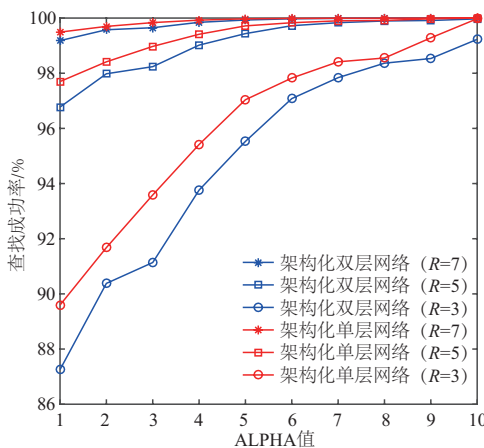


图2 不同网络下查找成功率随ALPHA值的变化趋势

3.2 双层结构化分布式对等

由图3可知,随着丢包率增加,网络的时延逐渐降低,并且增长速率也逐渐降低.在丢包率大于0.1%之后传输时延趋于稳定;对于网络的查询成功率来说,在

丢包率大于0.9%之后趋于平稳.在增加并发查找数目后查找成功率也有所改善.意味着在该网络中,当链路质量较差造成一定的丢包率后虽然查找时延趋于稳定但查找成功率持续下降,所以保证低轨卫星链路连接的可靠性有一定的必要性,当下兴起的互联网卫星星座(例如StarLink系统)便是通过广泛部署低轨卫星来增强星间链路连接.

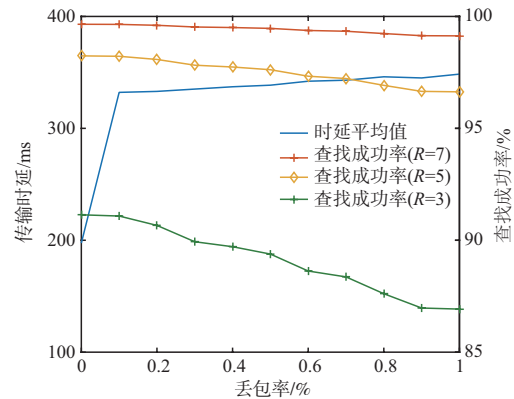


图3 查询成功率和传输时延随丢包率的变化趋势

我们以给定的概率执行节点添加或删除(失败),由图4可知,随着节点的加入或删除,整体的平均延迟变化不大.对于卫星网络来说,随着低轨卫星层数的增加,地面用户可连接节点的移动性进一步增强,因此所以该网络适用于节点移动自由的卫星网络.

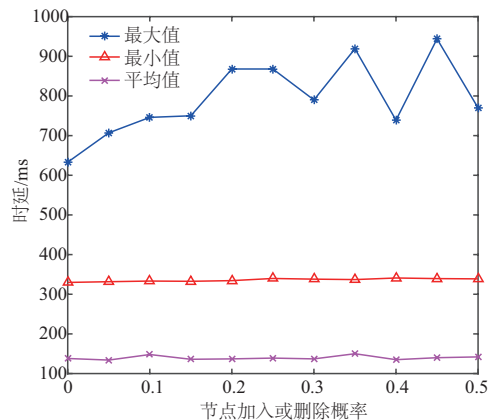


图4 时延随节点加入与删除概率的变化趋势

4 结论

本文基于天基信息港通过引入对等网络,增强了卫星网络的健壮性、可拓展性,并利于利用卫星网络执行分布式任务.通过设计网络模型并搭建天基信息港结构化分布式对等共享网络仿真平台Space-based PeerSim,利用该平台对网络性能进行了具体的分析.仿真结果表明,我们所设计的方案符合对等共享网络

的性能特点,验证了方案设计的合理性.并且结构化分布式双层网络在多节点多数据的大型网络场景下,通过系统设置后可保证查找成功率98%以上.

参考文献

- [1] 庞立新,冯建元,李杰,周志成.天基信息网络发展与应用[J].无线电通信技术,2021,47(1):12-18.
PANG L, FENG J Y, LI J, ZHOU Z C. Development and application of space information network[J]. Radio Communication Technology,2021, 47(1): 12-18. (in Chinese)
- [2] 李斌,刘乘源,章宇兵.天基信息港及其多源信息融合应用[J].中国电子科学研究院学报,2017,012(3):251-256.
LI B, LIU C Y, ZHANG Y B. Space-based information port and its multi-information fusion application[J]. Journal of China Academy of Electronic and Information Technology, 2017, 12(3):251-256. (in Chinese)
- [3] 陈姝,方滨兴,周勇林.P2P技术的研究与应用[J].计算机工程与应用,2002,38(13):20-23.
CHEN S, FANG B X, ZHOU Y L. The research and application of P2P technology[J]. Computer Engineering and Applications,2002, 38(13): 20-23. (in Chinese).
- [4] 李华,范鑫鑫,秘建宁,等.空天地一体化网络安全防护技术分析[J].中国电子科学研究院学报,2014,9(6):592-597.
LI Hua, FAN Xing-xing, MI Jian-ning, et al. Development and application of space information network[J]. Journal of China Academy of Electronic and Information Technology, 2014,9(6): 592-597. (in Chinese)
- [5] 汪春霆,李宁,翟立君,等.卫星通信与地面5G的融合初探(一)[J].卫星与网络,2018,(9):14-21.
- [6] 张昊,戴长华,张翀.一种构建Kademlia网络拓扑的高效算法[J].计算机应用研究,2009,26(2):534-536.
ZHANG Hao, DAI Chang-hua, ZHANG Chong. An efficient algorithm for building Kademlia topology[J]. Application Research of Computers,2009, 26(2): 534-536. (in Chinese)
- [7] CHOWDHURY F, FERDOUS M S. Performance analysis of R/Kademlia, Pastry and Bamboo using recursive routing in mobile networks[J]. International Journal of Computer Networks & Communications,2017, 9(5): 41-54.
- [8] 李凤华,殷丽华,吴巍,等.天地一体化信息网络安全保障技术研究进展及发展趋势[J].通信学报,2016,37(11):156-168.
LI Feng-hua, YIN Li-hua, WU Wei, et al. Research status and development trends of security assurance for space-ground integration information network[J]. Journal on Communications,2016, 37(11):156-168. (in Chinese)

- [9] JOSEPH S. An extendible open source P2P simulator[J]. P2PJournal, 2007, 11(7): 1-15.
- [10] XU H, et al. A survey of peer-to-peer simulators and simulation technology[J]. Journal of Convergence Information Technology, 2011, 6(5): 260-272.

作者简介



宋唐益嘉 女,1998年1月生于湖南常德.现为北京邮电大学信息与通信工程学院硕士研究生.主要研究方向为卫星网络、网络功能虚拟化等.
E-mail: styj_christina@bupt.edu.cn



胡鹤飞(通讯作者) 男,1977年5月生于重庆.现为北京邮电大学副教授,研究生导师.主要研究方向为卫星网络,网络功能虚拟化及其他新型网络.
E-mail: huhefei@bupt.edu.cn