

基于SDN的高可用MANET模型设计

朱清超

武警工程大学信息工程学院, 陕西 西安

收稿日期: 2022年1月15日; 录用日期: 2022年2月11日; 发布日期: 2022年2月21日

摘要

针对网络资源可用性低的问题, 提出一种基于SDN的高可用MAENT结构模型。模型引入动态哈希算法缓解控制平面和数据平面的拓扑失配问题, 利用前缀匹配树实现拓扑失配的局部修复, 通过修改南边界APIs函数的规则提高网络兼容性。利用Mininet、FlowVisor和GT-ITM等开源软件设计了测试平台, 对模型连通度、时延和吞吐量等可用性指标进行了仿真分析。结果表明, 新模型连通度提高了9%, 时延降低了60%, 吞吐量提高了2.3 Mbps, 一定程度上改善了网络资源可用性。

关键词

软件定义网络, 移动自组网, 动态哈希算法, 时延, 吞吐量

Design of High Available MANET Model Based on SDN

Qingchao Zhu

College of Information Engineering, Engineering University of PAP, Xi'an Shaanxi

Received: Jan. 15th, 2022; accepted: Feb. 11th, 2022; published: Feb. 21st, 2022

Abstract

A higher available mobile ad hoc networking (MANET) model was proposed based on software defined network (SDN), aiming at the issue of the network with low available resources. The model remitted the topology mismatching problem through introducing dynamic Hash algorithm, realized local topology mismatching reparation by prefixes matching tree, and improved network compatibility via modifying southern boundary application programming interfaces (APIs) functions running rule. Moreover, corresponding test platform was developed by open source software like Mininet, FlowVisor and GT-ITM. Three performance indicators called connection degree, delay and throughput were analyzed by simulation. Results show that, for the proposed model, con-

nection degree increases about 9%, delay decreases about 60%, and throughput improves 2.3 Mbps, all of which make network resources availability better to some extent.

Keywords

Software Defined Network (SDN), Mobile Ad Hoc Networking (MANET), Dynamic Hash Algorithm, Delay, Throughput

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

软件定义网络(Software Defined Network, SDN)控制平面(Control Plane, CP)实现控制分组交互, 数据平面(Data Plane, DP)实现分组交付, 可机制有效解决移动自组网(Mobile Ad Hoc Networking, MANET)单平面固化问题[1] [2]。

文献[3]指出由于 MANET 的移动性和局部特性, MANET 与 SDN 融合(后记为 SDN-MANET)的研究集中于: 规范化结构设计、流管理策略改善灵活性、处理节点增/删事件、优化 MANET 孤岛等。文献[4]在分析 SDN 各平面构成、功能的基础上, 针对 MANET 节点移动性导致的拓扑时变性问题, 提出了 SDN-MANET 的基本雏形, 但是未解决南边界 APIs 函数设计问题。文献[5]指出可通过 SDN 流控制机制改善 MANET 的 QoS 性能, 避免 DOS 攻击对时延和丢包率产生较大的影响, 提高网络的适应能力及资源可用性。文献[6]利用了 SDN-MANET 机制的灵活性, 实现了电厂视频数据的交互, 实例验证了模型的可行性, 但未考虑对资源利用率的影响。文献[7]针对节点移动、退出等行为引发的不可靠问题, 基于控制平面和数据平面的路由选择逻辑分割方法, 提出混合结构模型并加以验证。文献[8]针对 5G 中 MANET 部署节点移动引发的不可靠连接, 基于 SDN 的监测管理机制, 提出了 RaDRT 协议改善 QoS 服务。文献[9]指出虫洞攻击依然是 SDN-MANET 面临的安全性问题, 基于邻节点相似度原理, 提出了 SWANS 模型, 改进了网络脆弱性, 但假设 DP 层与 CP 层拓扑完全匹配。文献[10]针对 SDN-MANET 协议对 MAC 层、PHY 层交互较少的不足, 基于 SDR 技术提出了一种交叉优化机制, 在不增加控制开销的基础上, 性能得到改善。总之, SDN-MANET 多集中于路由协议、流量管理等问题的研究, 限于 SDN-MANET 平台 APIs 函数的复杂性以及拓扑失配问题, 规范化结构与 MANET 孤岛问题研究较少, MANET 孤岛问题的解决依赖 SDN-MANET 的结构模型。

为了提高资源可用性, 需要研究能够兼具 SDN 技术优势(高灵活性和低开销)和传统 MANET 协议体系优势(高抗毁性和分布式)的新型组网结构。论文在现有 MANET 组网模型和 SDN 双平面结构研究基础上, 尝试设计一种基于 SDN 的高可用性 MANET 模型, 以期改善网络的资源可用性。

2. 高可用模型结构设计

为了将 SDN 分层传输优势与传统的 MANET 技术相结合, 考虑到 MANET 协议体系中网络层至传输层协议建立在链路层之上, 不直接与底层物理网络交互, 且路由开销比重较大, 因而将其映射到 CP 层; 而链路层与物理网络节点及拓扑结构紧密相连, 且该层控制比特与数据部分同时传输, 因而将其映射到 DP 层, 此时便实现了 CP 和 DP 层的分离及双平面控制, 这与 SDN 和 MANET 融合组网的思想是一致的。

同时通过 CP 层与 DP 层的映射，能够提高各层之间的执行效率，改善资源的可用性。基于以上分析，本节设计的基于 SDN 的高可用 MANET 模型示意图如图 1 所示(灰色 SDN APP 部分只引入数据流，不设计相应程序，因而可视为双平面模型)。

此外，由于基于 SDN 的 MANET 模型形成了 DP 层和 CP 层，实现了控制分组和数据分组的分割，但摆脱 DP 层而研究 CP 层易导致拓扑失配，失配问题限制了路由效率和资源分配，因此需进一步考虑将 DP 层真实物理网络映射到 CP 层抽象拓扑中。动态哈希算法通过哈希运算、哈希子表映射、链表指针映射等机制在映射效率、流量跟踪、链表深度与精度等方面具有明显的优势，并在逻辑层与物理结构匹配中得到广泛应用，因此在此引入动态哈希算法[11]。动态哈希算法需要构建全网哈希域，对于完全分布式 MANET 而言，该方法对节点移动性支持不足。为此本节稍作改进，采用基于 hello 协议的分簇映射机制，在提高算法收敛速度的同时，一定程度上考虑了节点的移动性。具体流程为：多节点执行 hello 协议启动动态哈希算法，将所得拓扑信息共享，短时内便可构建一定规模的哈希环域，如图 2(a)所示。例如网络初始阶段，节点 C、P、E 分别建立各自的局部哈希环，第二次、第三次分别扩展到邻节点 A、D、O、N、M、L 和 G。同时在映射过程中，节点之间的物理连接关系(拓扑结构)同步实现共享，经过动态哈希运算后，CP 层根据物理可达性，构建与之对应的虚拟层，为上层路由的选择提供数据基础，各节点所维持的哈希环域如图 2(b)所示，不难看出三个节点哈希运算共享后很快便拥有了其它节点的拓扑信息，效率越来越高，且算法以指数形式收敛。

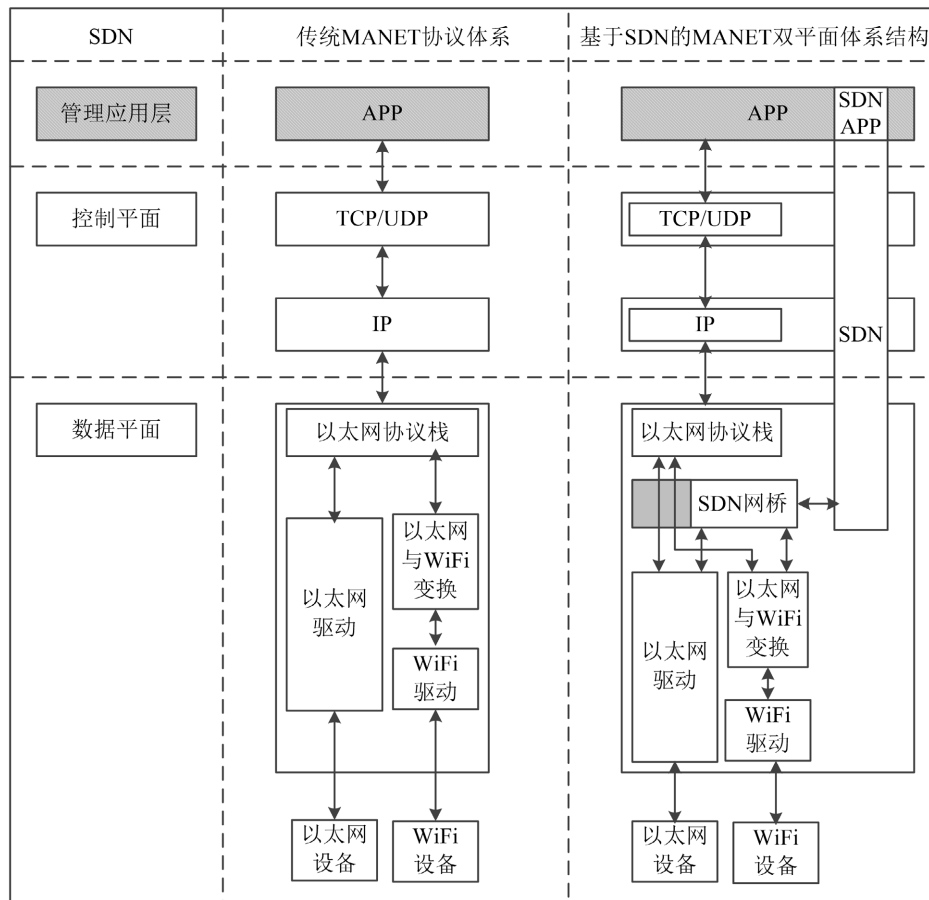


Figure 1. Flowchart of model structure for MANET based on SDN

图 1. 基于 SDN 的 MANET 模型结构图

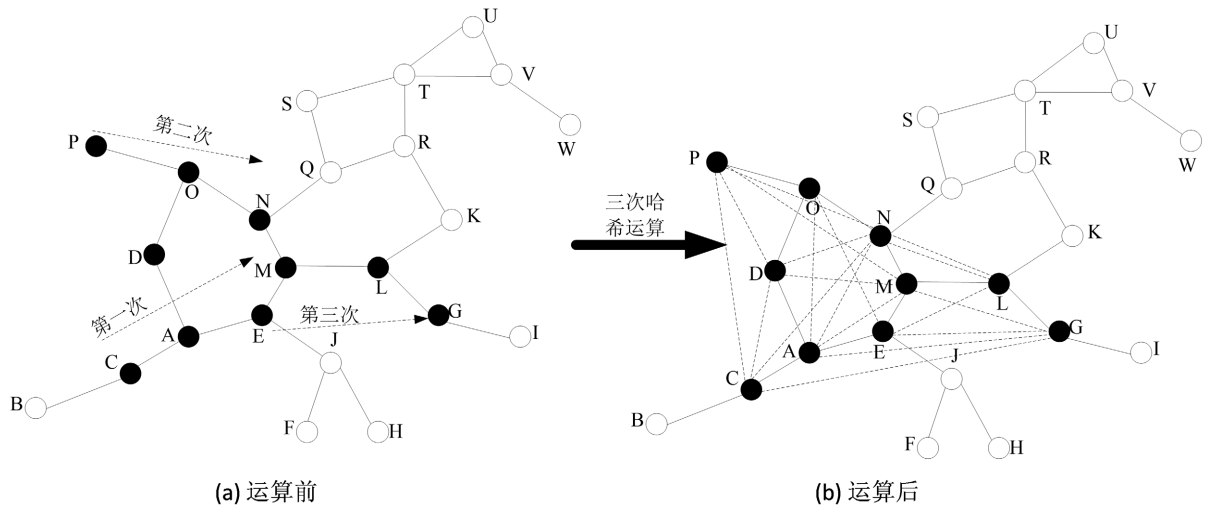


Figure 2. Hash field establishment from DP to CP
图 2. DP 层至 CP 层的哈希环域构建

虽然动态哈希算法建立了 DP 层和 CP 层之间的映射关系，但是受限于动态哈希算法本身的不足，当部分节点加入或退出网络时，仍存在二者之间的失配问题，此时 CP 层路径信息并非最优，因此必须建立一种拓扑失配对应的局部修复机制。前缀匹配树[12]以较低的时间复杂度($O(\log(N))$)定位失配点并完成替代功能，其规则为：假设将 MANET 物理节点映射到一个深度为 d 的树形结构上，根节点用逻辑地址 0 表示；对应树中第 i 层节点，其逻辑地址为 $a_0a_1 \cdots a_{i-1}$ ，则该节点的第 j 个子节点逻辑地址为 $a_0a_1 \cdots a_{i-1}j$ 。其中根节点局部动态变化，但均以数据发送节点作为基准点，并运用递归算法逐步实现相邻物理节点的映射，若某处节点出现断点，则意味着对应编号的节点由于特殊原因离开网络，并基于当前树形结构，本节首选兄弟节点替代原节点重新构建生成树，实现拓扑失配时的局部修复，图 3 为前缀匹配树构造实例。图中根节点 0 具有两个子节点 01 和 02，同时 01 子节点为 011、012，012 连接叶节点 0121，当节点 012 退出网络即 012->0121 链路失效时，将 012 节点切换至 011，快速建立 011->0121 的链路。

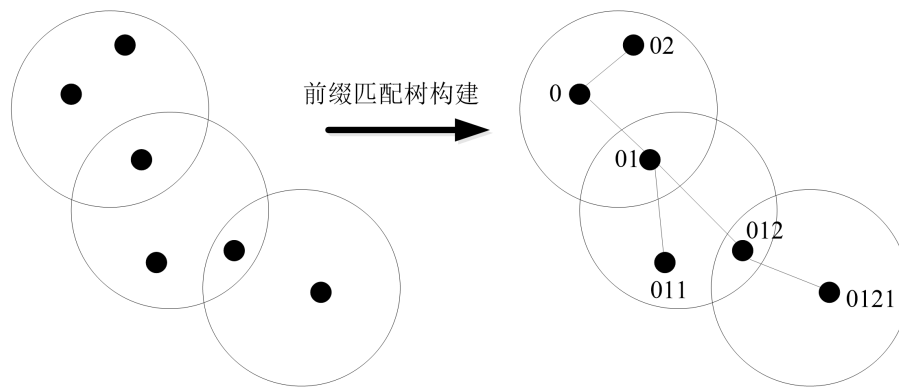


Figure 3. Construction example of prefix matching tree
图 3. 前缀匹配树构造实例

在此基础上，由于 SDN 与 MANET 的对应关系，不仅要考虑其它网络(Ethernet 等)兼容性，而且需要实现 MANET 节点之间的互通，因此原始的南边界 APIs 函数已经捉襟见肘，在此将其部分功能通过 SDN 网桥实现，对 APIs 采用如下规则修改：与传统网络互通时，无需经过 SDN 模块，直接利用原始协

议栈通信，因而 APIs 保持不变；与改进 MANET 互通时，需要兼顾链路层及上层协议之间的透明传输，因而在此通过将对应的 MANET 分层收发函数移植到改进网络模型实现上述功能。

3. 模型测试

3.1. 测试环境

模型设计过程中通过网络结构的移植实现 CP 层和 DP 层的对应，不修改系统内核算法，因此模型测试可通过针对 SDN 和 MANET 的成熟软件进行仿真测试。基于该实际情况，测试平台通过开源轻量级软件 Mininet 生成 CP 层和 DP 层对应节点和拓扑结构，CP 层和 DP 层平面之间利用 FlowVisor 执行互通映射，双平面中通过 GT-ITM 请求模拟网络数据传输，应用层通过 ping 命令测试网络连通性，底层的 CPU、GPU、硬盘、内存等提供硬件资源和计算资源，Ubuntu16 提供系统内核资源，同时采用 Python、Matlab 作为编程语言、作图工具。为简化测试环境，Mininet、FlowVisor 和 GT-ITM 模型参数均采用默认值[13][14]，节点数为 50，分组大小为 1500 字节，任意两个节点之间传输分组概率为 0.5。综上本节测试环境平台如图 4 所示。

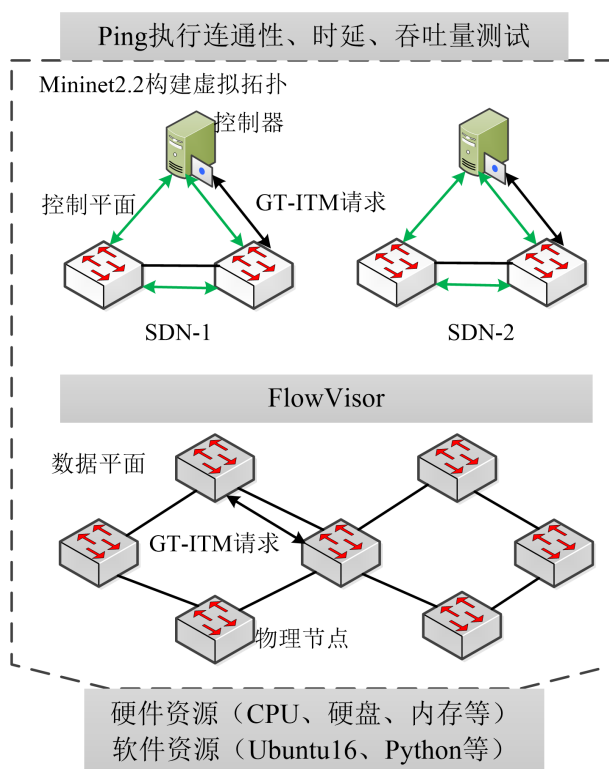


Figure 4. Deployment chart of test environment

图 4. 测试环境部署图

3.2. 测试结果

用于衡量资源可用性的指标包括连通性、时延和吞吐量等。其中连通性用于测试节点之间是否存在良好、稳定的链路，是模型能否正常工作的基础，可分为物理连通性测试和逻辑连通性测试，前者测试物理节点之间是否互通，后者测试协议之间能否到达，本节仅关注模型的逻辑连通性，用连通节点与总节点数的比值表示(记为连通度)，连通度越大越好；时延用于测试模型的反映速度，分为使用时延和接入

时延，前者测试数据收发所经历的时间，后者测试节点之间建立连接所需的时间，本节仅关注使用时延，用数据端到端的往返时延表示，其值越小越好；吞吐量用于测试资源能够满足用户需求的能力，其值越大越好。网络拓扑连接图(连线表示链路)、连通度、时延、吞吐量测试结果分别如图 5~8 所示。

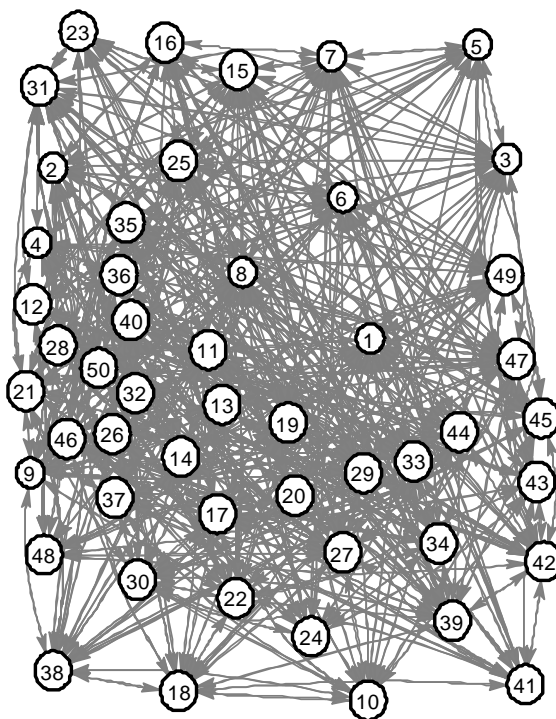


Figure 5. Topology diagram
图 5. 拓扑结构示意图

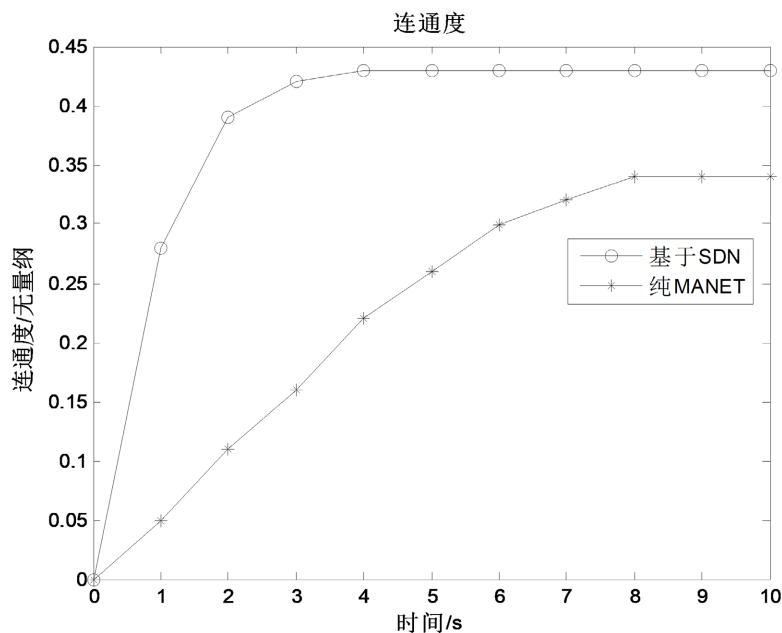


Figure 6. Chart of connection degree
图 6. 连通度曲线图

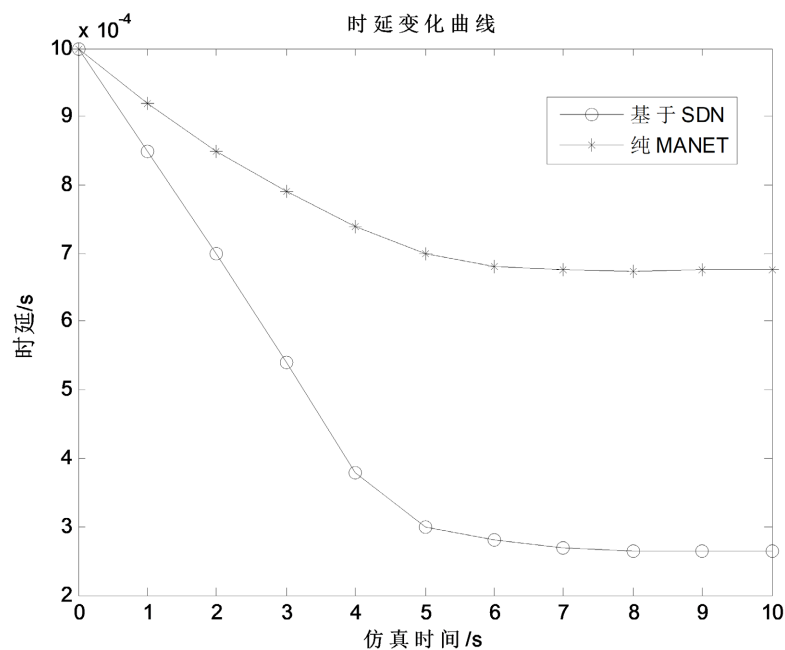


Figure 7. Chart of delay variation

图7. 时延变化曲线图

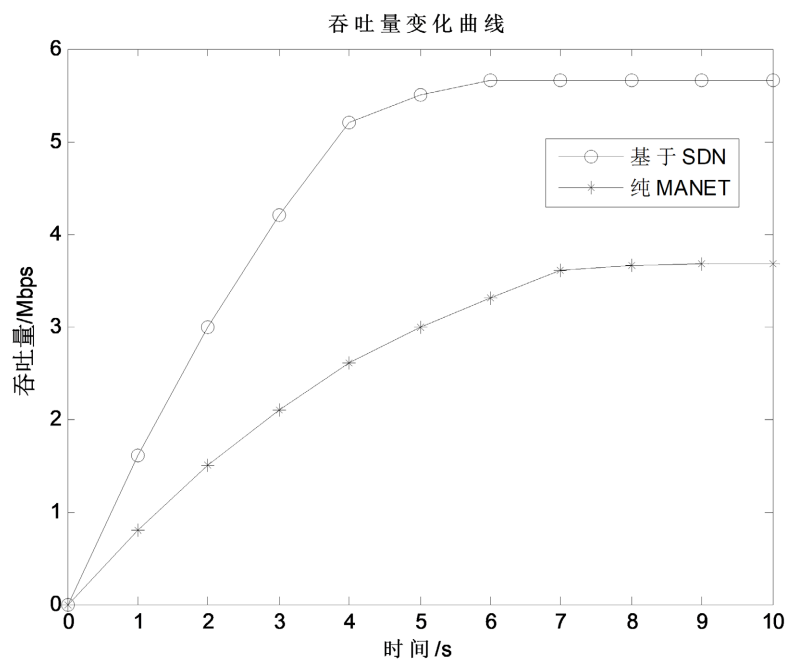


Figure 8. Chart of throughput variation

图8. 吞吐量变化曲线图

从图6可知,就连通度而言,基于SDN的高可用MANET模型(记为OSDN-MANET)和纯MANET连通度整体变化趋势一致,均先逐步增加,后进入稳态而后保持。前者稳态时连通度约为42%,后者约33%,意味着分组并发传输时OSDN-MANET比纯MANET链路可用性高9%,比SDN-MANET [4]高5%。原因在于前者通过CP层,在不消耗DP层链路资源的基础上,实时调整链路资源,降低链路堵

塞或空闲概率，同时通过动态哈希算法、前缀匹配树和 APIs 的修改降低了拓扑失配概率，提升了算法运行效率，与之对应的资源利用率得以提高。

从图 7 可知，就时延而言，OSDN-MANET 和纯 MANET 开始分组传输时，二者均需通过特定手段建立路由连接，时延相对较高，当传输分组达到一定数目时，时延处于稳态。同时前者稳态时延约 2.8 ms，而后者约 7 ms，时延降低了 60%，意味着同等条件下，前者比后者传输更快，且性能比 SDN-MANET [4] 低 1 ms。原因在于 OSDN-MANET 中 CP 层在感知到链路状态和分组数量后，从逻辑层面进行优化分配，既避免了 DP 层网络分组数的增加，又提高了运算效率，且哈希动态运算自身的高效性降低了运算时间，故时延迅速降低。

从图 8 可知，就吞吐量而言，OSDN-MANET 和纯 MANET 开始分组传输时，需要确定路由信息后执行数据交互，因此吞吐量从 0 逐步上升，当网络分组基本饱和时网络处于稳态并保持。前者稳态时吞吐量约 5.5 Mbps，后者约 3.2 Mbps，意味着 OSDN-MANET 为用户提供的容量可用性比纯 MANET 高 2.3 Mbps，比 SDN-MANET [4] 高 1 Mbps。原因在于 SDN 双平面中 CP 层感知到数据分组激增时，从逻辑层面实现了链路优化，使得吞吐量得以改善。

总之，OSDN-MANET 连通性、时延和吞吐量均得到明显改善，资源利用率提高。

4. 结论

论文针对 MANET 资源可用性问题，提出一种基于 SDN 的高可用 MANET 结构模型，采用动态哈希算法和前缀匹配树算法降低了 DP 层和 CP 层的拓扑失配，通过修改南边界 APIs 函数的运行规则提高了网络的兼容性，而后通过 Mininet、FlowVisor 和 GT-ITM 等开源平台实现了模型性能测试。结果表明新模型在连通度、时延和吞吐量等方面均得到改善。

参考文献

- [1] Cisco System Inc. (2017) Cisco Visual Networking Index: Forecast and Methodology White Paper 2015-2020. <https://max.book118.com/html/2017/1206/143048523.shtm>
- [2] Yang, Z. and Yeung, K.L. (2020) SDN Candidate Selection in Hybrid IP/SDN Networks for Single Link Failure Protection. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, **28**, 312-321. <https://doi.org/10.1109/TNET.2019.2959588>
- [3] Bellavista, P., Dolci, A. and Giannelli, C. (2018) MANET-oriented SDN: Motivations, Challenges, and a Solution Prototype. 2018 *IEEE 19th International Symposium on WoWMoM*, Chania, 12-15 June 2018, 14-22. <https://doi.org/10.1109/WoWMoM.2018.8449805>
- [4] Nguyen, J. and Yu, W. (2018) An SDN-Based Approach to Support Dynamic Operations of Multi-Domain Heterogeneous MANETs. *Proceedings of IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Busan, 27-29 June 2018, 21-26. <https://doi.org/10.1109/SNPD.2018.8441071>
- [5] Streit, K., Rodday, N., Steuber, F., Schmitt, C. and Rodosek, G.D. (2019) Wireless SDN for Highly Utilized MANETs. 2019 *International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob)*, Barcelona, Barcelona, 21-23 October 2019, 226-234. <https://doi.org/10.1109/WiMOB.2019.8923172>
- [6] Chen, X., Wu, T., Sun, G. and Yu, H. (2019) Software-Defined MANET Swarm for Mobile Monitoring in Hydropower Plants. *IEEE Access*, **7**, 152243-152257. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2948215>
- [7] Poularakis, K., Qin, Q., Marcus, K.M., Chan, K.S., Leung, K.K. and Tassiulas, L. (2019) Hybrid SDN Control in Mobile Ad Hoc Networks. 2019 *IEEE International Conference on Smart Computing (SMARTCOMP)*, Washington DC, 12-15 June 2019, 110-114. <https://doi.org/10.1109/SMARTCOMP.2019.00038>
- [8] Streit, K., Schmitt, C. and Giannelli, C. (2020) SDN-Based Regulated Flow Routing in MANETs. 2020 *IEEE International Conference on Smart Computing (SMARTCOMP)*, Bologna, 14-17 September 2020, 73-80. <https://doi.org/10.1109/SMARTCOMP50058.2020.00030>
- [9] Alenezi, F.A.F., Song, S. and Choi, B.Y. (2021) SWANS: SDN-Based Wormhole Analysis Using the Neighbor Similarity for a Mobile Ad Hoc Network (MANET). 2021 *IFIP/IEEE International Symposium on Integrated Network Management (IM)*, Bordeaux, 17-21 May 2021, 653-657.
- [10] Kafetzis, D., Vassilaras, S., Vardoulis, G. and Koutsopoulos, I. (2022) Software-Defined Networking Meets Soft-

ware-Defined Radio in Mobile Ad hoc Networks: State of the Art and Future Directions. *IEEE Access*, **10**, 9989-10014. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3144072>

- [11] 颜文, 陈征. Hash 索引算法综述[J]. 无线通信技术, 2019, 28(2): 19-29.
- [12] 王新锋, 刘建国, 蒋旭, 杨磊, 杨会民. 基于前缀匹配的二进制搜索算法及仿真[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(13): 4198-4201.
- [13] 杨俊东, 尹强, 张硕. 基于 Mininet 的 SDN 仿真与性能分析[J]. 信息通信, 2017(3): 189-191.
- [14] 唐俊勇, 王辉. 基于 Mininet 的 SDN 仿真与建模研究[J]. 电子设计工程, 2018(12): 78-82+87.