

改进的无线 Mesh 网路由判据算法及其路由协议^①

王兴¹, 蔡毅²

¹(浙江广厦建设职业技术学院 信息与控制工程学院, 东阳 322100)

²(北京大学深圳研究生院 信息工程学院, 深圳 518055)

摘要: 为了改善 802.11s 无线 Mesh 网传输过程中因重传次数过大而造成的丢包问题, 根据实际无线传输中的网络重传次数特性, 提出一种基于最大重传次数的空中传播时间改进路由判据算法. 同时为了缓解因单根节点造成的网络拥塞, 提高实际场景中边缘节点的传输性能, 并保证网络中所有节点使用无线信道资源的公平性, 基于树的寻径机制从拓扑结构的角度, 提出一种改进的多根节点的混合无线 Mesh 网路由协议(M-HWMP). 理论及仿真结果表明, 改进的路由判据算法及路由协议优化了无线 Mesh 网传输不同数据流时的吞吐量、时延特性, 并在一定程度上避免了网络拥塞.

关键词: 无线网状网; 802.11s 协议; 路由判据; 空中传播时间路由判据; 混合无线网状网路由协议

Improved Wireless Mesh Routing Metric Algorithm and Protocol

WANG Xing¹, CAI Yi²

¹(School of Information & Control Engineering, Zhejiang Guangsha College of Applied Construction Technology, Dong yang 322100, China)

²(School of Information & Computer Engineering, Shenzhen Graduate School, Peking University, Shenzhen 518055, China)

Abstract: To handle the problem of packet loss caused by the large number of retransmission times in the IEEE 802.11s-based wireless mesh network, a novel airtime link metrics algorithm based on maximum number of retransmission times was proposed according to the retransmission characteristics in the actual wireless network. Meanwhile, an improved Multi-root Hybrid Wireless Mesh Protocol (M-HWMP) based on tree-based rooting mechanism was proposed to alleviate the network congestion caused by the topology with single root node. This modified protocol can also improve the transmission performance of the edge node in some practical scenarios and ensure fairness of the use of wireless channel resources. Theory and simulation results showed that the improved algorithm and protocol can optimize the throughput and delay of different data flows in Wireless Mesh Network, and also can avoid network congestion to some extent.

Key words: wireless Mesh network; 802.11s; link metrics; airtime link metrics; HWMP

无线 Mesh 网(Wireless Mesh Network, WMN)是一种新型的网络组织形式, 具有多跳、自组织、自愈合、高带宽及便于架设的特点. 作为 WMN 的核心功能, 路由协议负责协同解决因无线环境的频繁变化而带来的各种问题, 支持 WMN 中节点之间的可靠传输. 空中传播时间路由判据(Airtime Link Metric, ALM)和混合无线网状网路由协议(Hybrid Wireless Mesh Protocol, HWMP)是 WMN 标准 IEEE 802.11s^[1]默认的路由判据及协议.

评判一个 WMN 路由协议的好坏往往需要从以下几个方面进行分析:

(1)可靠性. WMN 网络链路或者节点发生故障时, 能够依靠冗余链路保证正常传输, 同时具备自愈功能, 对链路信息进行及时更新.

(2)公平性. 离网关(Mesh Portal, MPP)较远的节点, 往往因为链路跳数过多, 带宽资源降低出现无法发送数据甚至“饿死”的现象. 而靠近根部的拓扑部分会产生拥塞并造成严重的丢包, 成为网络流量的瓶颈.

^① 基金项目:国家自然科学基金(61340046);浙江省教育技术规划课题(JB125);浙江省教育厅一般科研项目(Y201534483)

收稿时间:2015-09-09;收到修改稿时间:2015-11-02

(3)QoS 支持. WMN 网络一方面信道容量受限、多种干扰信号存在, 另一方面需要支持多媒体业务传输和大规模用户接入, 所以对 Qos 的支持是 WMN 路由协议的一个关键需求.

近年来针对 802.11s 中默认空中传播时间路由判据和 HWMP 表现出来的种种缺陷, 出现了多种改进方法^[2-9]. 其中, 龙昭华^[2]等通过提取 MAC 层中的网络分配矢量(Network Allocation Vector, NAV)参数, 将 NAV 作为节点间相互干扰的度量加入到 ALM 判据中, 解决传统判据算法中没有考虑节点干扰的问题. 姜腊林^[3]等通过引入链路中数据流内和数据流间的干扰作为路径信道性能的评判指标, 研究了链路数据流干扰对路由判据的影响. 何凌^[6]等提出 HWMP 的改进算法, 能快速地计算出到任意目的节点的最优路径, 解决 WMN 网络业务繁重时, 数据包碰撞增加导致丢包率急剧增加的问题. 黄卫华^[8]等提出一种基于节点状态的路由算法, 该算法在某链路将变为不可靠时, 确定其中一个节点对该链路状态进行监控, 该节点随后选择周边的一个节点替代自己的下一跳并进行一个本地路由修护. 该算法通过节点状态, 选择备用链路, 提高了 WMN 的可靠性. 沈呈^[9]等提出一种基于多个协议层的综合判据路由协议, 通过跨层操作机制分析了无线链接长度以及通信效率对链路的影响. 上述方法在对空中时间路由判据的改进中, 增加了一些 WMN 性能要素的判断, 但都没有考虑实际 WMN 中重传次数限制对路由性能的影响, 而且都没有对 HWMP 的拓扑结构进行优化. 本文提出一种基于实际 WMN 的重传次数限制的空中传播时间路由判据. 同时, 从优化拓扑结构的角度出发, 提出一种改进的多根节点 M-HWMP.

1 空中传播时间路由判据及改进

空中传播时间路由判据是 802.11s 标准的默认路由判据, 反映了在一条链路中传输一个数据帧所消耗的无线信道资源数量. 这个路由判据的设计充分考虑到了具体网络实现和协作时的简便. 每条链路的空中传播时间判据值 C_a 可由公式(1)得到^[1]:

$$C_a = \left[O_{ca} + O_p + \frac{B_t}{r} \right] \frac{1}{1 - e_{fr}} \quad (1)$$

式中, O_{ca} , O_p 和 B_t 为常数, 其取值依赖于 IEEE 802.11 所规定的传输拓扑, 如 802.11a/b/g/n/s 等, 802.11a/b 对

应的值由表 1 给出. 其中输入参数 r 为比特速率, 单位为 Mbps. 速率 r 由本地的速率适应机制决定, WMN 中的节点根据当前条件以该速率发送一个大小为 B_t 的帧. e_{fr} 是长度为 B_t 的被测试数据帧的帧错误率.

表 1 O_{ca} , O_p 和 B_t 的取值^[10]

参数	含义	802.11a	802.11b
O_{ca}	信道接入负载	75μs	335μs
O_p	协议负载	110μs	364μs
B_t	测试帧的比特数	8224	8224

目前传统对路由判据的研究大都假定一个数据包在链路层的重传次数是没有限制的. 但在实际的 WMN 中, 每个节点重传一个数据包的次数是有限的. 因此这种假设的结果会造成, 挑选出来的“最优路径”中某些链路可能存在大的重传次数. 该类研究应用到实际的路由过程中时, 由于受到重传次数的限制, 将发生丢包现象, 而且越靠近终点, 丢包的代价越高. 以图 1 为例, 从源节点 S 到目的节点 D 有两条可选路径. 以每条链路成功传输一个数据包的概率作为该链路上的权重. 在重传次数没有限制的情况下, 假设上路径 1(S, X, Y, D)的传输期望总次数为 7, 下路径 2(S, A, B, C, D)的传输期望总次数为 8, 传统路由算法没有考虑重传次数可得路径 1 优于路径 2. 但如在实际 WMN 中存在重传次数限制的情况下, 假设其重传次数限制为 2 次, 路径 1 由于质量差的链路(Y, D)太靠近目的节点 D , 一个数据包期望传输总次数是 11, 而路径 2 中一个数据包的期望传输总次数仅为 8, 因此路径 2 优于路径 1. 因此在实际应用场景中, 每条路径必须考虑数据包因为重传次数超过限制而被丢弃的可能性.

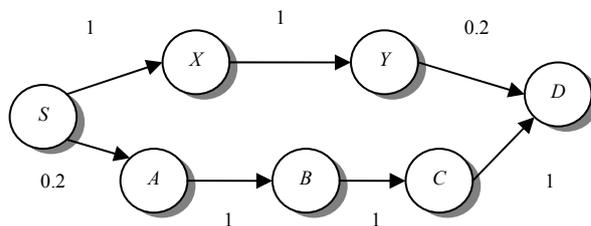


图 1 重传次数限制对网络传输的影响

针对 802.11s 空中传播时间路由判据没有考虑到重传次数限制对 WMN 传输性能的影响. 本文提出了一种基于重传次数限制的空中传播时间路由判据, 具体描述如下:

假定一个包含有 n 条链路 $v_1, v_2, \dots, v_{n-1}, v_n$ 的 WMN 路径拓扑图(如图 2 所示), 每条链路 (v_{i-1}, v_i) 的权重为 p_i ($0 \leq p_i \leq 1$). p_i 表示该链路上单次传输一个数据包的成功概率, 且重传次数 $\leq K$.

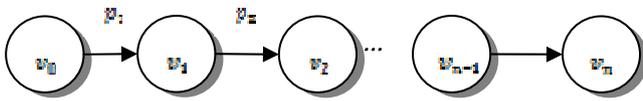


图 2 n 链路拓扑图

因此, n 链路上传输次数期望 $E[v_n]$ 可表示为^[11]:

$$E[v_n] = \sum_{i=0}^{n-2} \left(E_i \frac{p_{i+1}}{p_n} \right) + K \frac{1-p_n}{p_n} + E_{n-1} \quad (2)$$

其中, $p_i = \prod_{j=1}^i \pi_j, \pi_j = 1 - (1 - p_j)^k$, 表示一个数据包在链路 (v_{j-1}, v_j) 上不被丢弃的概率;

$E_j = \sum_{j=1}^K J \frac{(1-p_j)^{j-1} p_j}{1 - (1-p_j)^{k+1}}$ 表示链路 (v_i, v_{i+1}) 的期望传输次数.

由公式(2)可看到传输期望次数 $E[v_n]$ 满足贪心算法的两点特性. (a)贪心选择性质, 即所求问题的整体最优解可通过一系列局部的最优选择求得. (b)最优子结构性, 即问题的最优解包含其子问题的最优解. 因此, 可采用贪心算法计算 $E[v_n]$ ^[12]:

$$E[v_n] = \frac{E[v_{n-1}]}{\pi(v_{n-1}, v_n)} + K \frac{1 - \pi(v_{n-1}, v_n)}{\pi(v_{n-1}, v_n)} + E_{n-1} \quad (3)$$

其中, v_{n-1} 和 v_n 是相邻两节点, $\pi(v_{n-1}, v_n)$ 是 v_{n-1} 和 v_n 之间传输不丢包的概率. E_{n-1} 是 v_{n-1} 和 v_n 之间的期待传输次数.

考虑到在空中传播时间路由判据中, e_p 错误率与链路的期望传输次数成正相关的关系, 而且 O_{ca}, O_p 和 Bt 为常量, 将公式(1)与公式(3)结合, 即可得到改进后的空中传播时间路由判据的计算公式:

$$C_a(V_n) = \left[O_{ca} + O_p + \frac{Bt}{r} \left[\frac{E[v_{n-1}]}{\pi(V_{n-1}, V_n)} \right] \right] + K \frac{1 - \pi(V_{n-1}, V_n)}{\pi(V_{n-1}, V_n)} + E_{n-1} \quad (4)$$

由式(4)可见, 由于加入了重传参数 K , 考虑了实际 WMN 重传次数限制, 使优选出来的路由不会产生大的重传次数, 减少因中间链路传输失败而从源节点重新传输的情况, 从而提高实际网络的传输效率, 降低丢包率和时延.

2 HWMP及改进的多根节点HWMP

2.1 HWMP 基于树的寻径机制

HWMP 是 802.11s 的默认路由协议. 它根据 Ad Hoc 按需距离矢量路由协议^[13](Ad Hoc On Demand Distance Vector Routing, AODV), 与基于树状拓扑的先验式路由协议相结合进行路由发现和维护, 也可靠节点本身执行路由功能, 充分结合了先应式和反应式路由协议的优点.

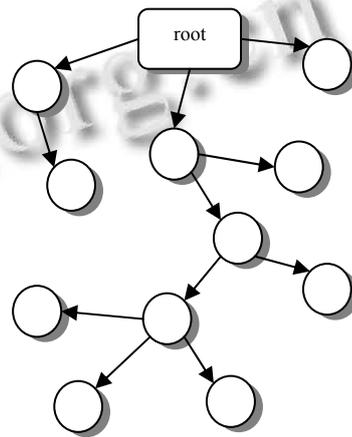


图 3 HWMP 基于树的寻径机制

HWMP 基于树的寻径机制如图 3 所示, 在 WMN 中, 如果一个节点被配置为根节点(Root), 则该根节点首先用根通知信息(Root Announcement)宣称自己的存在, 收到 Root Announcement 的其它节点更新路由信息, 发现维护到达根节点的路径, 通过这种方式从根节点逐步建立 WMN. 如果 WMN 中有多个节点具备成为根节点的资格, 则 WMN 会通过动态的优选过程自动选择产生一个根节点. 当一个节点想发送数据至另一节点而又没相应路由时, 该节点可以发送数据帧到根节点. 根节点若在其本地 WMN 路由表中找不到相符表项, 则将其转发至上行链路. 否则, 根节点用特殊的发送地址项把报文发送至目的节点. 这种混合机制可以使初始的数据帧通过树状拓扑路径转发, 而之后的数据帧通过源节点和目的节点间的最优按需路径转发.

在 HWMP 设定只有一个根节点, 由该根节点维护整个 WMN 树状拓扑. 这种设置对 WMN 会有如下影响:

(1) WMN 靠近根部的拓扑部分会成为网络流量的瓶颈. 在根节点附近会产生拥塞并造成严重的丢包.

(2) 如果根节点出现故障, 则由于它的唯一性, WMN 将进入混乱状态, 并需要重建网络拓扑, 这将消耗大量时间.

(3) WMN 网络规模受限. WMN 规模过大时, 距离根节点较远的节点由于跳数多、链路质量差, 导致传输效果不佳.

2.2 HWMP 基于树的寻径机制的改进

为解决以上问题, 本文对这种基于树的寻径机制进行改进, 提出一种多根节点的 HWMP. 首先通过 HWMP 基于树的寻径机制产生一个主根节点 (Main-root), 然后由这个主根节点根据 WMN 的拓扑, 跳数和路由判据等信息, 决定其余几个具有成为根节点资格的节点作为副根节点 (Vice-root), 并向全 WMN 广播, 要求各节点根据链路质量选择根节点并注册. 考虑 802.11s 默认 WMN 大小为 32 个节点以内, 故改进的新寻径机制产生的根节点个数一般选为 2, 视具体网络场景, 最多可扩展到 4 个.

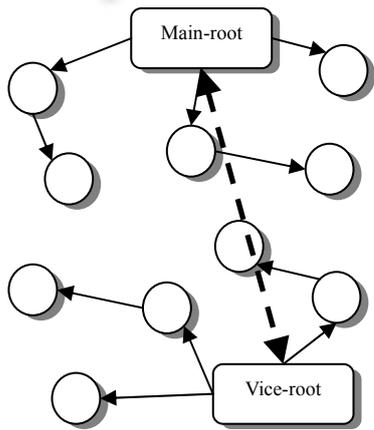


图 4 改进后的 HWMP 基于树的寻径机制

改进后的新寻径机制如图 4 所示. 新寻径机制中主根节点 Main-root 与副根节点 Vice-root 具体产生以及运行过程描述如下:

(1) 若 WMN 已预设根节点, 在网络拓扑建立阶段, 所有的根节点通过广播 Root Announcement 建立拓扑树. 其中只有一个是 Main-root, 其余根节点都为 Vice-root.

(2) 若 WMN 未预设根节点, 运行根的选择机制, 首先进行主根节点的选择. 通过动态优选过程, 选出一个网关 MPP 作为 Main-root, 然后主根节点在其路由表信息中, 选择跳数最大的 MPP 为 Vice-root. 如果

多个 MPP 的跳数一样大, 那么将根据路由判据的好坏对其排序, 并选择路由判据最好的 MPP 为 Vice-root, 然后向 WMN 发送多根节点公告帧 (Multi-root Announcement) 宣告 Main-root 和 Vice-root 同时存在. Main-root 和 Vice-root 向 WMN 发送 Root Announcement, 建立以自己为根的拓扑树, 并将所有 MPP 信息保存备用.

(3) 在 WMN 运行过程中, 如果 Main-root 出现故障, Vice-root 经过确认机制后, 转化为 Main-root; 如果 Vice-root 出现故障, 由 Main-root 重新指定新的 Vice-root, 并通过发送 Multi-root Announcement 通告更新根节点信息, 保障 WMN 的正常运行.

改进后的多根节点协议 M-HWMP 缓解了因单根节点造成的网络拥塞, 增强了边缘节点的传输性能, 并提高了无线信道资源的使用公平性. 改进协议中设立的副根节点一方面可以分担主根节点的负担, 避免超大跳数的低质路由的出现, 另一方面通过与主根节点的相互通信确认机制, 保证出现异常后的 WMN 可以迅速恢复正常, 从而保证了网络的稳定性, 提高了 WMN 的平均吞吐量并减少了丢包率.

3 仿真结果及分析

本文采用网络仿真工具 NS-2^[14], 对上述改进的无线网状网路由判据算法及相应路由协议进行仿真, 并与传统的路由判据算法及路由协议做比较. WMN 仿真场景设置如下: 在网络拓扑大小为 2000M2000M 的区域内, 产生 32 个固定节点的随机拓扑, 每个节点的传输范围 200M. 无线传播模型设置为 TwoRayGround. 传输业务采用 10 条 UDP 数据流, 每条数据流的数据包大小 512Bytes, 场景持续时间 100s. 改进后的路由算法采用基于重传次数限制的空中传播时间路由判据和多根节点协议 M-HWMP, 其中最大重传次数限制设为 10. 为了从微观的角度对所有节点网络资源的利用率和公平性进行比较, 将 10 个数据流分别进行追踪统计. 如果将数据发送速率设为 64Kb, 得到的吞吐量和时延分别如图 5 和图 6 所示.

从图 5 可以发现, 传统算法各数据流对网络的利用率差别很大, 其中数据流 1, 数据流 8, 数据流 9 和数据流 10 的节点对网络资源的利用率很差, 甚至出现被“饿死”现象, 公平性差. 这是因为单根节点造成网络拥塞, 使跳数较大的边缘节点传输性能急剧下降, 同

时 WMN 内部的数据传输也不稳定。

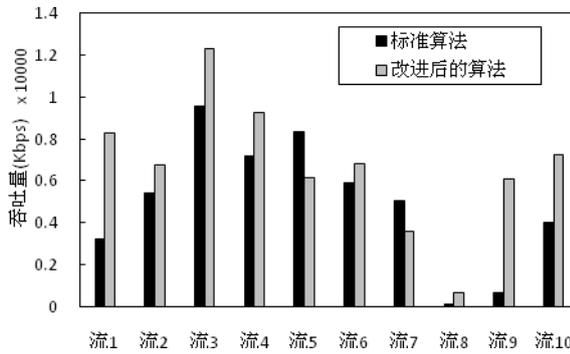


图 5 改进后的算法与原算法不同数据流吞吐量比较

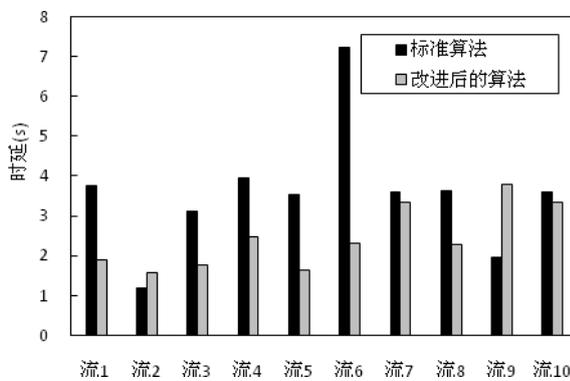


图 6 改进后的算法与原算法不同数据流延时比较

从图 6 可以看出, 数据流 6 的延时很大, 总体延时也较大. 这是因为 WMN 中优选的某些路径存在很大的重传次数期望, 从而造成严重的丢包. 但是对比可明显看到改进后算法由于副根节点的设置带来的各种优势, 包括网络拥塞得到缓解、边缘节点的传输性能得到提高、公平性得以增强. 从图 5 可以看出, 改进后的算法使得数据流 1, 8, 9 和 10 的吞吐量提升了一倍, 而其它数据流的吞吐量基本维持原有水平. 新算法对不同数据流平均吞吐量的提升达到 35.54% 左右. 从图 6 中的数据可以得出, 改进后的算法使得各数据流的平均延时从 3.56s 下降到 2.44s 左右, 下降幅度为 31.46%. 这是由于改进后的路由判据减小了带有大重传次数的链路成为最优路由的可能, 优选的路由能保证更好的链路质量, 减少了延时.

为了使评价结果具有一般性和统计意义, 本文进一步对不同数据发送速率下网络的平均吞吐量, 平均延时, 丢包率和路由开销率变化进行仿真. 通过数据包的发送速率从 10Kb 增大到 120Kb, 验证两种算法在

不同网络负载下的传输性能, 得到结果如图 7、图 8、图 9 和图 10 所示. 从图 7 数据可以得到, 同一数据流在不同的发送速率下, 改进后的算法将平均吞吐量提升了 10.90%.

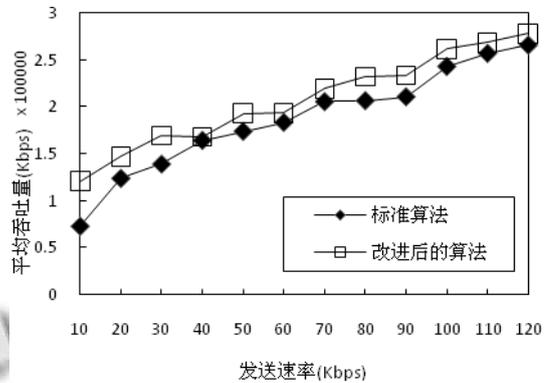


图 7 改进后的算法与原算法平均吞吐量比较

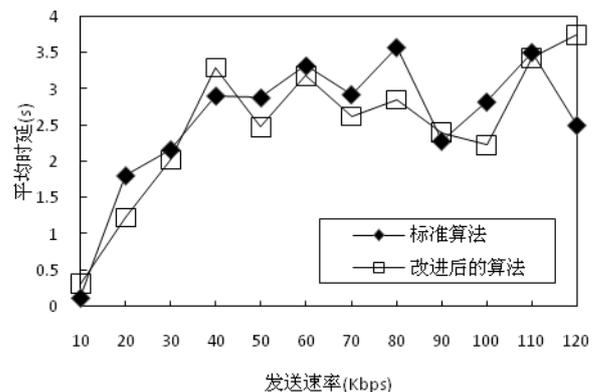


图 8 改进后的算法与原算法平均延时比较

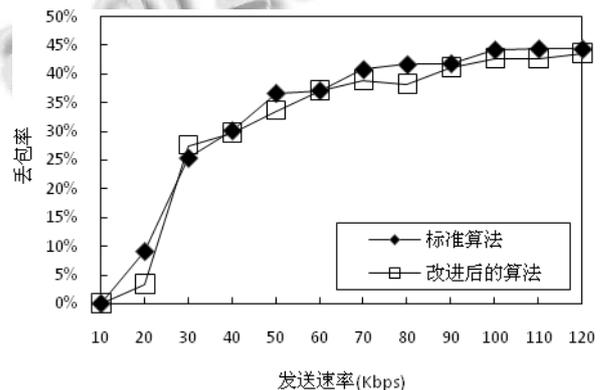


图 9 改进后的算法与原算法丢包率比较

而从图 8, 9 看出, 新的算法对延时和丢包率的改进并不明显, 大约都在 5% 左右. 但是由于改进后的算法改善了 WMN 中因重传次数过大而造成的丢包问题, 使优选的路由符合真实 WMN 传输的特性. 该方法也

能缓解因单根节点造成的网络拥塞,减少超长跳数传输情况的出现,提高实际场景中边缘节点的传输性能,并保证网络中所有节点使用无线信道资源的公平性。所以在不同的数据流下测试得到的图5、图6显示改进后的算法在平均吞吐量,平均时延上都保持对传统算法的明显优势。

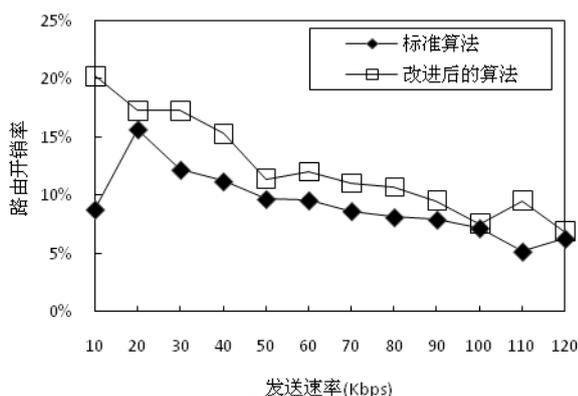


图10 改进后的算法与原算法路由开销率比较

从图8可以发现某些情况下,改进后的算法的平均延时有一定增大,这是因为多根节点的结构使网络拓扑初始的建立时间变长。同时在图10也可以看出,改进后的算法的路由开销率有所增大,这是由于设立多根节点的网络拓扑后WMN的路由广播数量增大,增加了路由开销。

4 结束语

本文根据实际无线传输中的网络重传次数特性,针对HWMP中路径选择判据的不足,提出的基于重传次数限制的空中传播时间的改进路由判据算法以及对单根节点的拓扑结构进行改进,提出的改进的多根节点的混合无线网状网路由协议M-HWMP。经理论及仿真与传统算法进行比较表明,该算法与协议可以优化WMN传输不同数据流时的吞吐量、时延和丢包率等特性。同时可以缓解因单根节点而造成的网络拥塞,解决WMN无线信道传输性能下降和公平性变差等问题,为WMN布网提供了一种更符合实际应用的高可靠性解决方案。

参考文献

- 1 IEEE 802.11-2012: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. 2012.
- 2 龙昭华,侯彦强,张林.基于HWMP协议的路径选择判据研究.计算机工程与设计,2013,34(3):791-794.
- 3 姜腊林,李琦沁,熊兵.数据流干扰感知路由判据的研究.计算机工程与应用,2013,49(21):90-94.
- 4 何施茗,张大方,谢鲲,等.多并发无线网状网中的机会路由算法.电子学报,2013,42(5):1004-1008.
- 5 江禹生,任晶晶,何芳.基于多准则的无线网状网路由判据.计算机工程与应用,2010,46(28).
- 6 何凌,黄俊.基于混合无线网状网协议的改进算法研究.计算机应用研究,2011,28(5):1846-1849.
- 7 Kim J, Kim D, Lim K W, et al. Improving the reliability of IEEE 802.11 s based wireless mesh networks for smart grid systems. Journal of Communications and Networks, 2012, 14(6): 629-639.
- 8 黄卫华,廖勇,王聪.基于节点状态的无线 Mesh 网络路由算法.计算机工程,2011,37(17):64-66.
- 9 沈呈,陆一飞,夏勤.基于综合判据的无线 Mesh 网路由协议.计算机学报,2010,33(12):2300-2311.
- 10 IEEE 802.11 TGs. Joint SEE-Mesh/Wi-Mesh Proposal to 802.11 TGs. IEEE P802.11 Wireless LANs. 2006.
- 11 Jakllari G, Eidenbenz S, Hengartner N. Link positions matter: A noncommutative routing metric for wireless mesh networks. IEEE Trans. on Mobile Computing, 2011, 11(1): 61-72.
- 12 Cormont T, Leiserson C, Rivest R. Introduction to Algorithms. America: McGraw Hill, 2009.
- 13 Perkins C, Belding-Royer E, Das S. IETF RFC 3561. Ad-hoc On-demand Distance Vector (AODV) Routing. 2003.
- 14 Calvo RA, Campo JP. Adding multiple interface support in NS-2. University of Cantabrias, 2007.