

IEEE 802.11s 路由切换分析与改进

游波^{1,2}, 阎跃鹏^{1,2}

(1.中国科学院 微电子研究所, 北京 100029; 2.昆山市工业技术研究院, 江苏 昆山 215300)

摘要: 分析了 IEEE 802.11s 中混合无线 mesh 协议的路由切换行为, 并针对切换过程中的分组丢失问题做出了改进。在 IEEE 802.11s 的 mesh 对等连接管理协议中加入基于接收信号强度的门限判定机制, 通过控制对等连接状态改变 HWMP 的路由切换时机, 避免了路由切换时的分组丢失。实验结果表明在节点低速移动的不受控无线环境中, 相比传统的 IEEE 802.11s, 该改进方案的分组丢失率下降了 2%~5%。

关键词: 分组丢失率; 路由协议; 对等连接; 混合无线网状网协议; 接收信号强度

中图分类号: TP393.02

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2012)09-0023-08

Analysis and improvement of route switch in IEEE 802.11s

YOU Bo^{1,2}, YAN Yue-peng^{1,2}

(1. Institute of Microelectronics of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

2. Kunshan Industrial Technology Research Institute, Kunshan 215300, China)

Abstract: Analyzed the route switch of hybrid wireless mesh protocol(HWMP) in IEEE 802.11s and made an improvement to reduce the packet lost rate when routes switching was analyzed. Based on the received signal strength indicator(RSSI) a scheme with judgment threshold in mesh peer link management protocol was proposed, which controlled the status of peer link to change the timing of route switch. In this way, the packet lost was avoided. The experimental results show that the improvement reduces the packet lost rate by 2%~5% compared with traditional IEEE 802.11s in uncontrolled wireless environment when nodes moving in low speed.

Key words: packet lost rate; routing protocol; peer link; HWMP; RSSI

1 引言

IEEE 802.11s^[1]是 IEEE 标准组为无线 mesh 网络(WMN, wireless mesh network)设计的一套协议标准, 提供邻居发现、路由维护、安全性管理等多项功能。HWMP(hybrid wireless mesh protocol)是 IEEE 802.11s 推荐的典型路由协议, 为 mesh 网络提供多跳网络最重要的路由发现、路由切换、路由管理以及数据转发等服务。作为一个工作在 2 层的混合路由协议, HWMP 可以同时为树状和网

状网络提供路由服务, 比传统的 3 层路由协议开销更小, 效率更高^[2]。

HWMP 作为一种较新的路由协议, 是学者们研究的热点, 现已有针对其各方面的研究成果发表。文献[3]针对不同的节点数量和数据分组大小对 HWMP 的吞吐量进行了研究; 文献[4]针对 HWMP 的安全性问题提出了改进意见; 文献[5]研究了 HWMP 在树状网络中的负载平衡问题; 文献[6]对 HWMP 进行了全面的介绍并对比了其 AODV(ad hoc on demand distance vector)的性能; 文献[7]对

收稿日期: 2011-09-21; 修回日期: 2012-03-28

基金项目: 国家科技重大专项基金资助项目(2009ZX03006-005, 2010ZX03006-003-02)

Foundation Item: The National Science and Technology Major Project Foundation of China (2009ZX03006-005, 2010ZX03006-003-02)

HWMP 的扩展性进行了研究;文献[8]认为空时 metric 的设计不合理并提出了一种探知竞争的新 metric;文献[9]提出了适用于 HWMP 的多径路由方案以降低路由查找开销;文献[10]对 HWMP 的路由稳定度进行了分析并提出了改进意见。虽然现有研究涵盖了 HWMP 的很多方面,但是 HWMP 的路由切换行为并没有得到重视,尚没有这方面的文章发表。本文填补了这方面的空白,贡献有 2 个方面:1) 针对移动节点详细地分析了 IEEE 802.11s 中 HWMP 的路由切换行为,发现了路由切换过程中的分组丢失问题并挖掘出其根本原因是空时 metric 对路径可靠程度反应不准确;2) 设计了基于 RSSI 的 mesh 对等连接管理协议 (RB-MPLMP, RSSI based-mesh peer link management protocol), 通过控制对等连接状态改变 HWMP 的路由切换时机,降低了路由切换时的分组丢失率。

2 IEEE 802.11s 路由切换分析

2.1 HWMP 和空时 metric

HWMP 由被动路由和主动路由 2 部分组成,其被动路由部分从 AODV 发展而来,加入感知链路质量的 metric 作为路由判据,是一种改进型的 AODV 式路由;其主动路由部分是针对树状网络应用的先验式路由,通过路由管理帧周期性地维护路由表。

HWMP 使用的 metric 称为空时 metric,反映了传输一个帧所需的时间,其公式如下

$$C_a = \left(O + \frac{B_f}{t_x} \right) \frac{1}{1 - e_f} \quad (1)$$

其中, O 是传输一个帧所需的固定开销,包括信道接入的开销和协议处理的开销,由设备的物理层决定; B_f 是帧的长度,以 bit 为单位; e_f 是该帧按照速率 t_x 发送时的错误率。空时 metric 具有可加性, HWMP 通过比较路径的空时 metric 的大小来判断路径的优劣。按照式(1),空时 metric 越小说明传输数据帧所需的时间越短,路径质量越好;空时 metric 越大说明传输数据帧所需的时间越长,路径质量越差。HWMP 在对所有可用路径进行比较之后选择空时 metric 最小的路径作为最佳路由。

为了分析方便,本文对空时 metric 作如下假设: O 、 B_f 、 t_x 固定不变;定义 e_f 为分组丢失率,即源节点发送的数据帧数量与接收到的确认帧数量之差和源节点发送的数据帧数量的比值。

2.2 HWMP 路由切换分析模型

本文采用如图 1 所示模型分析 HWMP 的路由切换行为。图中 A 、 B 为固定节点, C 为移动节点。每一节点的通信覆盖范围是以该节点为圆心的圆, R 对应 RSSI 的最小阈值,半径 R 以外无法与圆心处节点通信,称为无法通信区域; r 对应接收误码率小于 10^{-5} 的接收灵敏度,半径 r 以内有良好的通信质量,该区域内 e_f 为 0,称为可靠通信区域^[11]。 $R-r$ 环形区域内接收误码率随着与圆心距离增大而增大^[12],通信质量无法保证,该区域内 e_f 大于 0,称为不可靠通信区域。 D_1 为 A 的不可靠通信区域; D_2 为 A 与 B 可靠通信区域的覆盖区域; D_3 为 B 的不可靠通信区域。 M_1 、 N_1 分别为 D_3 区域两端, T_1 为 D_3 区域内发生路由切换的可能位置; M_2 、 N_2 分别为 D_1 区域两端, T_2 为 D_1 区域内发生路由切换的可能位置。

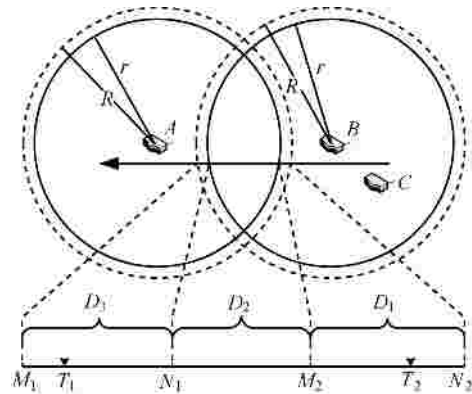


图 1 HWMP 路由切换分析模型

2.3 移动节点 HWMP 路由切换分析

C 此时与某节点通信 (图中未画出), 共有 2 条可用路径: P_a , 下一跳为 A , 路径总跳数为 H_a , 路径总 metric 为 C_a ; P_b , 下一跳为 B , 路径总跳数为 H_b , 路径总 metric 为 C_b 。 e_{fa} 为链路 $C-A$ 的分组丢失率, e_{fb} 为链路 $C-B$ 的分组丢失率, 2 条可用路径中除 $C-A$ 、 $C-B$ 外其余部分分组丢失率均为 0。

C 从当前位置沿实线向箭头方向移动 (不考虑移动速度), 路由切换行为根据 H_a 与 H_b 的大小关系有所不同, 共分以下 3 种情况。

1) $H_a > H_b$

C 进入 D_1 区域之前, 处于 A 的无法通信区域, 无法与 A 建立对等连接。此时 P_b 为通信路径, C_b 为 $\left(O + \frac{B_f}{t_x} \right) H_b$ 。

C 进入 D_1 区域, 处于 A 的不可靠通信区域, 与 A 建立对等连接。 C_b 为 $\left(O + \frac{B_t}{t_x}\right)H_b$; C_a 为 $\left(O + \frac{B_t}{t_x}\right)\left[(H_a - 1) + \frac{1}{1 - e_{fa}}\right]$, $e_{fa} > 0$ 。 $C_b < C_a$, 通信路径为 P_b 。

C 进入 D_2 区域, 处于 A 和 B 可靠通信区域的覆盖区域。 C_b 为 $\left(O + \frac{B_t}{t_x}\right)H_b$; C_a 为 $\left(O + \frac{B_t}{t_x}\right)H_a$ 。

$C_b < C_a$, 维持原通信路径 P_b 不变。

C 进入 D_3 区域, 处于 B 的不可靠通信区域。 C_b 为 $\left(O + \frac{B_t}{t_x}\right)\left[(H_b - 1) + \frac{1}{1 - e_{fb}}\right]$, $e_{fb} > 0$; C_a 为 $\left(O + \frac{B_t}{t_x}\right)H_a$ 。在从 N_1 向 M_1 移动的过程中, C 在 B 处的 RSSI 逐渐下降, e_{fb} 逐渐上升, C_b 逐渐增大, 直到移动至位置 T_1 时, C_b 等于 C_a , 到达切换临界点。继续移动, $C_a < C_b$, 通信路径切换至 P_a 。

以上分析可知, 当 $H_a > H_b$ 时, 路由切换的条件为

$$C_b > C_a \Rightarrow \left(O + \frac{B_t}{t_x}\right)\left[(H_b - 1) + \frac{1}{1 - e_{fb}}\right] > \left(O + \frac{B_t}{t_x}\right)H_a \Rightarrow e_{fb} > \frac{H_a - H_b}{H_a - H_b + 1}$$

2) $H_a = H_b$

C 进入 D_1 区域之前, 与 $H_a > H_b$ 时一致。

C 进入 D_1 区域, 与 $H_a > H_b$ 时一致。

C 进入 D_2 区域。 C_b 为 $\left(O + \frac{B_t}{t_x}\right)H_b$; C_a 为 $\left(O + \frac{B_t}{t_x}\right)H_a$ 。 $C_b = C_a$, 维持原通信路径 P_b 不变。

C 进入 D_3 区域, 处于 B 的不可靠通信区域, C_b 为 $\left(O + \frac{B_t}{t_x}\right)\left[(H_b - 1) + \frac{1}{1 - e_{fb}}\right]$, $e_{fb} > 0$; C_a 为

$\left(O + \frac{B_t}{t_x}\right)H_a$ 。 $C_a < C_b$, 通信路径切换至 P_a 。

以上分析可知, 当 $H_a = H_b$ 时, 路由切换的条件为 $e_{fb} > 0$, 即进入 D_3 区域。

3) $H_a < H_b$

C 进入 D_1 区域之前, 与 $H_a > H_b$ 时一致。

C 进入 D_1 区域, 处于 A 的不可靠通信区域, 与 A 建立对等连接。 C_b 为 $\left(O + \frac{B_t}{t_x}\right)H_b$; C_a 为

$\left(O + \frac{B_t}{t_x}\right)\left[(H_a - 1) + \frac{1}{1 - e_{fa}}\right]$, $e_{fa} > 0$ 。在从 N_2 向 M_2

移动的过程中, C 在 A 处的 RSSI 逐渐增大, e_{fa} 逐渐下降, C_a 逐渐减小, 直到移动至位置 T_2 时, $C_a = C_b$, 达到切换临界点。继续移动, $C_a < C_b$, 通信路径切换至 P_a 。

以上分析可知, 当 $H_a < H_b$ 时, 路由切换的条件为

$$C_a < C_b \Rightarrow \left(O + \frac{B_t}{t_x}\right)\left[(H_a - 1) + \frac{1}{1 - e_{fa}}\right] < \left(O + \frac{B_t}{t_x}\right)H_b \Rightarrow e_{fa} < \frac{H_b - H_a}{H_b - H_a + 1}$$

2.4 结论

从上述分析可知, HWMP 在路由切换时无法对路径的分组丢失率变化做出正确的、迅速的反应: 当存在多条可用路径的情况下, HWMP 有可能会选择分组丢失率大于 0 但跳数较少的路径作为最佳路由, 而非分组丢失率为 0 但跳数较多的路径。这个问题出现在上述分析的 2 种情况中: $H_a > H_b$, C 处于 N_1T_1 区域; $H_a < H_b$, C 处于 T_2M_2 区域。这个问题的出现导致 HWMP 在路由切换时无法保证可靠传输, 会出现分组丢失。

从 WMN 的应用角度讲, 大多数应用都要求数据分组传输的可靠性尽可能高, 即通信路径的分组丢失率尽可能低, 而 HWMP 不能满足这个要求。出现该问题的原因是 HWMP 仅仅利用路径的空时 metric 大小来选择最佳路由, 而分组丢失率在式(1)中的权重有限, 所以空时 metric 不能总是正确地反映路径的真实质量。考虑一个分组丢失率为 0 的 2 跳路径和一个分组丢失率大于 0 的 1 跳路径, 由式(1)可知, 1 跳路径的分组丢失率处于 0~50% 之间时, HWMP 认为该路径更好; 1 跳路径的分组丢失率大于 50% 时, HWMP 认为 2 跳路径更好。一旦 1 跳路径分组丢失率大于 0, 从传输可靠性上来看, 2 跳路径要优于 1 跳路径, 而 HWMP 必须在 1 跳路径的分组丢失率大于 50% 时才能选择 2 跳路径为最佳路由, 反应缓慢; 在 1 跳路径的分组丢失率大于 50% 之前, HWMP 一直错误地选择 1

跳路径作为最佳路由，造成分组丢失。

3 IEEE 802.11s 路由切换改进

HWMP 的路由切换行为增大了通信的分组丢失率，必须得到改进。本文改进的思路是绕开 HWMP 和空时 metric，从对等连接状态入手改变路由切换的时机。

3.1 RB-MPLMP

RB-MPLMP 是一种改进型的对等连接管理协议，在 IEEE 802.11s 中 mesh 对等连接管理协议的基础上加入了 RSSI 的判定机制，引入了判定门限 E_{R_th} 。为了分析方便，设定 E_{RSSI} 为相邻 2 节点中某一节点在另一节点处的接收信号强度。在 RB-MPLMP 中节点与相邻节点之间对等连接状态的处理如下。

- 1) 相邻节点不满足 mesh 对等连接管理协议，对等连接断开。
- 2) 相邻节点满足 mesh 对等连接管理协议，且 $E_{RSSI} \geq E_{R_th}$ ，对等连接建立。
- 3) 相邻节点满足 mesh 对等连接管理协议，但 $E_{RSSI} < E_{R_th}$ ，对等连接断开。

RB-MPLMP 通过加入 RSSI 的判定，缩小了节点的通信覆盖范围，提高了节点在其覆盖范围内的通信质量。

3.2 利用 RB-MPLMP 的路由切换分析

RB-MPLMP 改变路由切换时机的基本思路是：移动节点在其移动过程中与相邻路由节点的 RSSI 值会随着两者之间距离变化而变化，通过设置 E_{R_th} ，RB-MPLMP 控制移动节点和相邻路由节点的对等连接断开与建立的时机，改变网络的拓扑，迫使 HWMP 做出反应。

3.2.1 利用 RB-MPLMP 的路由切换分析模型

引入 RB-MPLMP 后，分析模型如图 2 所示。图中 r_{thA} 对应 A 的 E_{R_th} ，半径 r_{thA} 覆盖区域内可以与 A 建立对等连接，称为 A 的对等连接区域； r_{thB} 对应 B 的 E_{R_th} ，半径 r_{thB} 覆盖区域内可以与 B 建立对等连接，称为 B 的对等连接区域。 E_{R_thA} 为 A 的对等连接区域与 C 行进路线的交点， E_{R_thB} 为 B 的对等连接区域与 C 行进路线的交点。其余部分与图 1 一致。

3.2.2 基于 RB-MPLMP 的路由切换分析

C 从当前位置沿实线向箭头方向移动（不考虑移动速度），在移动至 E_{R_thA} 之前无法与 A 建立对等连接，选择通信路径 P_b ；C 进入 E_{R_thA} 至 E_{R_thB} 区

域，同时与 A 和 B 建立对等连接，此时选择 P_a 还是 P_b 作为通信路由由 HWMP 利用空时 metric 决定；C 越过 E_{R_thB} 以后，与 B 的对等连接断开，选择通信路径 P_a 。

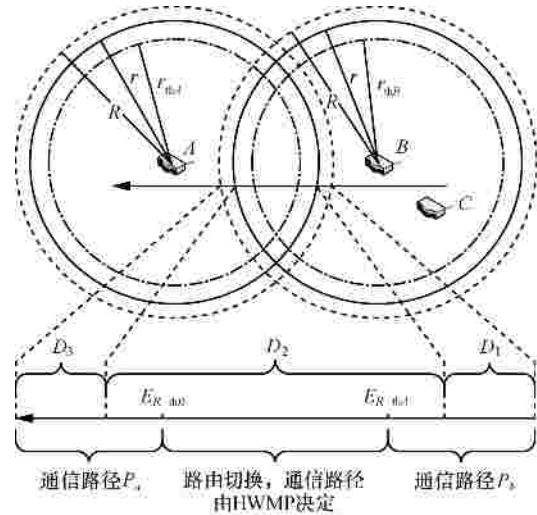


图 2 利用 RB-MPLMP 的路由切换分析模型

此时，HWMP 仅在 C 处于 E_{R_thA} 至 E_{R_thB} 区域内时利用空时 metric 的大小选择最佳路由，即路由切换只可能发生在 E_{R_thA} 至 E_{R_thB} 区域；受 RB-MPLMP 的影响，C 在其他区域时仅有 1 条可用路径，没有更多的路径供 HWMP 选择，不可能发生路由切换。由于 E_{R_thA} 至 E_{R_thB} 区域内 P_a 与 P_b 的 e_f 均为 0，在此区域内切换路径不会出现通信路径分组丢失率大于 0 的情况，切换过程中不会分组丢失。

3.3 RB-MPLMP 的优化

由于 RB-MPLMP 利用 E_{R_th} 决定对等连接状态，若 RSSI 在 E_{R_th} 上下抖动会造成对等连接不断地在建立与断开之间震荡，导致网络拓扑频繁变化，影响网络的稳定性。为了解决这个问题，本文对 RSSI 进行滤波处理，共分以下 2 步。

- 1) 将测得的 RSSI 通过指数加权滑动平均算法 (EWMA) 进行累积计算，公式如下

$$S_n = \begin{cases} 0, & n=1 \\ (1-a)S_{n-1} + aY_n, & n=2,3,\dots, a \in (0,1) \end{cases} \quad (2)$$

其中，

$$Y_n = \begin{cases} 100, & E_{RSSI} < E_{R_th} \\ 0, & E_{RSSI} \geq E_{R_th} \end{cases} \quad (3)$$

式(2)中， Y_n 为 EWMA 的 n 时刻瞬时值； S_n 为 EWMA 的 n 时刻结果； S_{n-1} 为 EWMA 的 $n-1$ 时刻

结果； a 为滑动平均因子。 a 的取值决定了该式中历史值和当前值的不同权重，较小的 a 可以降低当前值的权重，有助于平滑当前值的抖动。

2) 对 S_n 进行处理时引入了窗口机制，如下所示：

$S_n < S_{down}$ ，对等连接建立；

$S_n > S_{up}$ ，对等连接断开；

$S_{up} > S_n > S_{down}$ ，对等连接状态不变。

其中， S_{down} 为窗口下边界； S_{up} 为窗口上边界，两者取值为 0~100。 S_{down} 为对等连接建立的门限； S_{up} 为对等连接断开的门限； $S_{up} - S_{down}$ 为窗口长度，决定了对等连接建立与断开的转换速度，窗口越大转换越慢，反之亦然。窗口机制的引入使得 S_n 必须沿同一趋势积累（增大或减小）若干次才能实现对等连接建立与断开的转换。

以上优化过滤了 RSSI 的高频变化分量，减小了因为 RSSI 随机抖动带来的对等连接状态变化。本文用 MATLAB 对 RSSI 直接判断、仅利用 EWMA 和利用 EWMA 与窗口机制 3 种方法引起的对等连接状态变化进行了仿真对比，仿真参数设置如下。

$E_{R_th} = -60\text{dBm}$ E_{RSSI} 在 $[-50, -70]$ 服从均匀分布； $a = 0.2$ ，EWMA 的判定门限为 70； $S_{down} = 50$ ， $S_{up} = 80$ 。仿真结果如图 3 所示，其中图 3(a)纵轴为 RSSI 值；图 3(b)、图 3(c)和图 3(d)纵轴为对等连接状态，1 为建立，0 为断开；各分图横轴为测量次数。由图 3 可见，利用 RSSI 直接判断导致对等连接状态变化频繁，震荡频率最高；仅利用 EWMA 时，对等连接状态震荡频率下降；利用 EWMA 与窗口机制时，对等连接状态震荡频率最低。

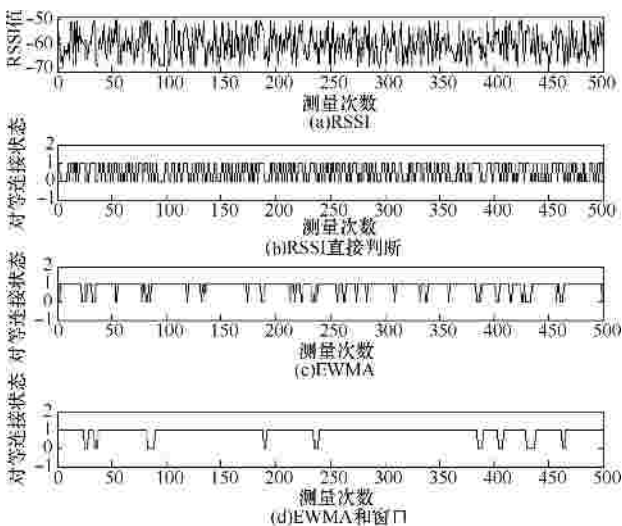


图 3 对等连接状态变化

3.4 RB-MPLMP 的其他问题讨论

1) E_{R_th} 的选择。 E_{R_th} 是 RB-MPLMP 中建立对等连接的接收信号强度门限，该值的选择依据是：从总体趋势上来看，在噪底相当的情况下，接收信号强度越大，通信质量越好，反之亦然。 E_{R_th} 越大则节点的通信范围越小，通信范围内的整体通信质量越好； E_{R_th} 越小则节点的通信范围越大，通信范围内的整体通信质量越差。若 E_{R_th} 小于 RSSI 的最小阈值，则 RB-MPLMP 失去作用。由于不同应用环境中噪底存在差异，所以 E_{R_th} 的最佳值不是固定的。该值应该在应用环境通过实际测试选择，且需要根据业务类型进行调整。

2) 对通信时延的影响。RB-MPLMP 虽然提高了节点之间的通信质量，但是一定程度上缩短了节点的通信范围，这有可能导致最佳路由的跳数增加，通信时延增大。根据长时间的测试结果，忽略分组丢失重传的影响，路由每增加一跳回路时延增加 2~4ms。在路由总跳数不大时，这对于一般的应用不会造成明显的影响。而 RB-MPLMP 本身以降低分组丢失率为目的，有效地避免了分组丢失重传的出现。

3) 路由稳定度及收敛速度。支持 IEEE 802.11a、b、g、n 的 Wi-Fi 网卡提供 RSSI 的计算功能，能够通过 IEEE 802.11s 现有的管理帧以及通信时的数据帧计算相应的 RSSI，所以 RB-MPLMP 可以直接从网卡提取 RSSI 信息，无需在 IEEE 802.11s 中增加其他管理帧，不会改变 HWMP 的路由机制和路由策略。由此推断，路由收敛速度不会受到影响。由于采用了 EWMA 和窗口机制对 RB-MPLMP 进行优化，路由不会因为对等链路的不稳定而频繁切换，路由稳定度得到了保证。

4) 节点资源消耗。EWMA 的引入提高了链路的稳定性，但在 Linux 内核中直接进行浮点运算会非常困难。算法实现时采用整形除法和移位操作可以有效地将浮点运算转换为整形运算，降低计算复杂度，节省节点的系统资源。经过测试，节点在采用整形除法和移位操作时的 CPU 使用率与 IEEE 802.11s 几乎相同，均为 3% 左右。所以本文方案保证了较低的计算复杂度，没有明显地增加节点的系统资源消耗。

5) 关于硬切换。这里所提到的硬切换是指通过设置强制指定通信路径，以图 1 为例，即在 D_1 中必须选择 H_b ，在 D_3 中必须选择 H_a 。表面上看，

这样的硬切换也能够保证可靠传输，但是至少存在一点不足：实际操作中无法确定 D_1 或 D_3 区域的具体范围，所以无法保证硬切换的时机是准确的。一旦切换时机不准确，硬切换便无法保证可靠传输。

4 实验分析

4.1 实验环境

本文采用对比实验来证明所述方案的有效性。实验平台是基于 S3C 2440 的 ARM 开发板，无线网卡芯片为 rt 2573。对比实验内核 2 套：一套为 Linux 2.6.35.4，该内核在 open IEEE 802.11s 中部分实现了 IEEE 802.11s，其中完全实现了 HWMP 和 mesh 对等连接管理协议；另一套在 Linux 2.6.35.4 基础上加以修改实现了本文方案。物理层配置为 IEEE 802.11b，关闭 WLAN 速率控制功能，固定 Wi-Fi 网卡发送速率为 12Mbit/s，IEEE 802.11s 其他配置参数均采用默认值，RB-MPLMP 相关参数设置如下： $E_{R_th} = -65\text{dBm}$ ， $a = 0.2$ ， $S_{down} = 50$ ， $S_{up} = 95$ 。测试环境为室外空旷地，实验拓扑如图 4 所示。

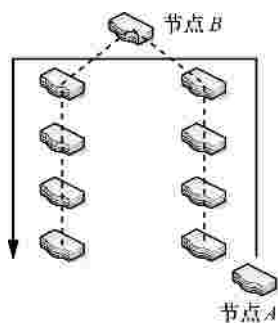


图 4 实验拓扑

图 4 中，所有节点均为 mesh 节点，配置在同一个 mesh 网络内，实验拓扑为网状拓扑，除节点 A 外其余 9 个节点位置固定，且在采用 RB-MPLMP 时仅与相邻的 2 个节点建立稳定的对等连接，如图 4 中虚线所示。

4.2 实验指标及方法

分组丢失率：采用 ping 程序对分组丢失率进行测试，ping 程序结果提供了分组丢失率的数据，且没有分组丢失重传机制。

回路时延：同样采用 ping 程序对回路时延进行测试。

吞吐量：采用 iperf 程序对吞吐量进行测试。

为了使实验结果更加准确，每一项测试均重复 10 次，每一次测试中节点 A 沿实线向箭头方向以 5km/h 的速度缓慢行进直至箭头处，移动过程中保持与节点 B 的通信。ping 采用默认设置，iperf 采用 TCP 负载。

4.3 实验结果及分析

图 5 是分组丢失率的测试结果。可以看到，采用 IEEE 802.11s 时分组丢失率在 3%~6% 之间；而采用本文方案时分组丢失率最低为 0.1%，最高也不过 1%，明显低于 IEEE 802.11s。采用 IEEE 802.11s 时，每一次路由切换都会使得通信路径在一段时间内处于分组丢失率大于 0 的状态，有可能导致 ICMP 分组的丢失。采用本文方案时，每一次路由切换前后的通信路径都处于分组丢失率为 0 的状态，路由切换过程不会造成更多的 ICMP 分组丢失，所以其分组丢失率相比 IEEE 802.11s 有明显的下降。此时分组丢失的主要原因是环境变化、外界干扰、信道冲突等因素，HWMP 在路由切换时的处理不当至少增加了 2% 的分组丢失率。

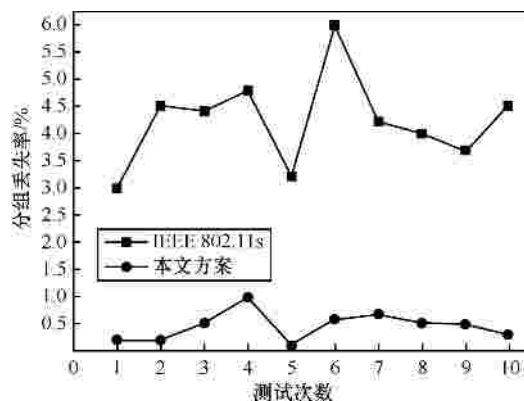


图 5 分组丢失率对比

图 6 是回路时延的测试结果。相比 IEEE 802.11s，本文方案的回路时延增大大约 1~3ms。这是两方面原因造成的：一是本文方案缩小了节点的通信范围，导致最佳路由的跳数增大，增加了回路时延。二是节点通信范围的缩小导致节点 A 在移动过程中比 IEEE 802.11s 更多次地切换最佳路由，每一次切换都会经历 HWMP 的路由建立过程，而 HWMP 较长的路由建立时延增大了整体的回路时延。虽然本文方案比 IEEE 802.11s 回路时延大，但 1~3ms 的差别并不会对一般的应用造成明显的影响，即使是对时延非常敏感的实时语音和图像传输也不会有明显的滞后感。

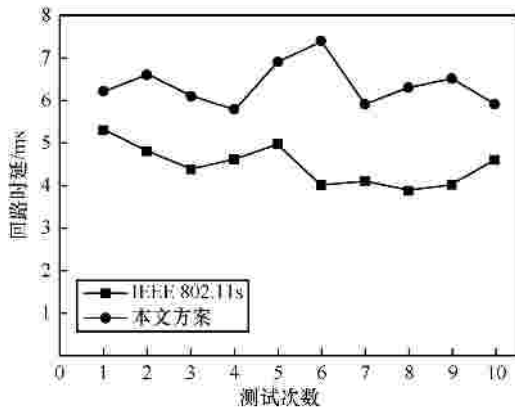


图 6 回路时延对比

图 7 是吞吐量的测试结果。从总体来看，本文方案的吞吐量要高于 IEEE 802.11s，这得益于本文方案较小的分组丢失率。IEEE 802.11s 虽然有较小的路由跳数，但其相对较大的分组丢失率降低了吞吐量。在节点 A 的移动过程中，IEEE 802.11s 的分组丢失率波动较大，导致吞吐量起伏明显。从 10 次测试结果来看，本文方案的平均吞吐量为 3.86Mbit/s，IEEE 802.11s 的平均吞吐量为 3.45Mbit/s，本文方案比 IEEE 802.11s 提高了约 11.9% 的吞吐量。

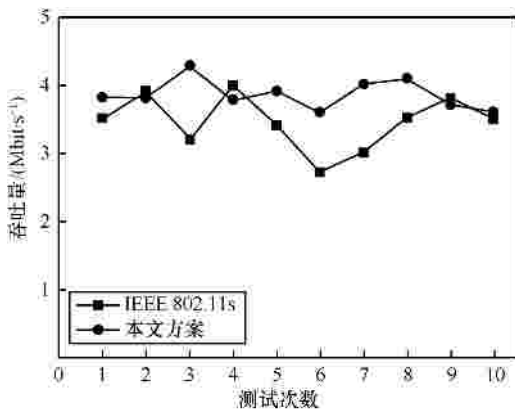


图 7 吞吐量对比

图 8 是节点 A 在不同移动速度下的分组丢失率测试结果，不同的移动速度由汽车定速行进获得。由于测试条件的限制，测试的最高速度为 30km/h。可以看到，当节点 A 的移动速度低于 30km/h 时，本文方案的分组丢失率保持在 1% 以下，始终低于 IEEE 802.11s 的 4%~6%，有效地降低了分组丢失率。从物理层上分析，高速移动带来的多普勒效应会对通信造成影响，但在本文测试的速度范围内，该效应的影响可以忽略。从路由协议上分析，移动节点在接入点切换时由于下行路由的切换滞后会引起分组丢失，但该分组丢

失现象在本文测试的速度范围内影响有限。如果节点 A 的移动速度极高，造成移动过程中的接入点切换速度高于 HWMP 的路由管理帧交互速度，则节点 A 总是无法找到一条可用的路由，这将导致严重的分组丢失，文献[13]对其进行了详细的分析。

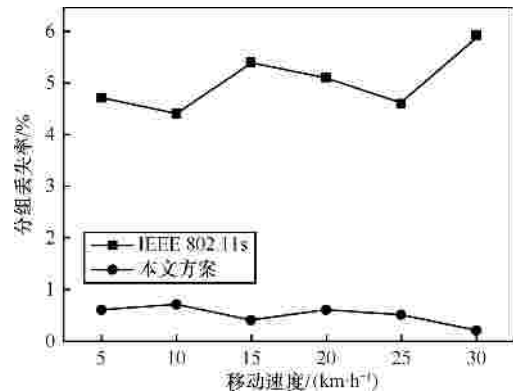


图 8 不同移动速度下的分组丢失率

5 结束语

本文分析了 IEEE 802.11s 中 HWMP 的路由切换行为，指出了由于空时 metric 对路径可靠程度反应不准确造成分组丢失问题。针对这一问题，改进了 mesh 对等连接管理协议，通过加入 RSSI 门限判定机制控制对等连接的建立与断开来改变 HWMP 的路由切换时机，避免了在路由切换时出现分组丢失。实验证明，本文方案在节点低速移动的网络中可以有效地降低 IEEE 802.11s 在路由切换时的分组丢失率，并且能够在 Linux 内核中实现，是一套实用的方案。

参考文献：

- [1] LAN/MAN Standards Committee. IEEE 802.11sTM/D5.0-2010 IEEE Draft Standard for Information Technology- Telecommunications and Information Exchange Between Systems-Local and Metropolitan Area Networks-specific Requirements-part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications : Amendment 10:Mesh Networking [S]. New York, IEEE Computer Society, 2010.
- [2] HIERTZ G, DENTENEER D, MAX S. IEEE 802.11s: The WLAN mesh standard[J]. IEEE Wireless Communications, 2010, 2: 104-111.
- [3] SAHIL S, ANIL G, GURDIT S. Throughput analysis of HWMP routing protocol in wireless mesh networks[A]. Proceedings of International Conference on Recent Trends in Business Administration and

- Information Processing(BAIP 2010)[C]. Trivandrum, Kerala, India, 2010. 482-484.
- [4] JALEL G, BENITEZ S. On securing HWMP using IBC[A]. Proceedings of 2011 IEEE International Conference on Communications[C]. Beijing, China 2011. 5962921.
- [5] HU M, ZHANG J, YUE G. A novel load balancing scheme for hybrid routing protocol in IEEE 802.11 mesh network[A]. Proceedings of 2010 3rd IEEE International Conference on Broadband Network and Multimedia Technology[C]. Beijing, 2010. 5705169.
- [6] 杨凯, 马建峰. 混合无线网状网路由协议[J]. 通信学报, 2009, 30(11A):133-139.
YANG K, MA J F. Hybrid wireless mesh protocol[J]. Journal on Communications, 2009, 30(11A): 133-139.
- [7] NASSEREDDINE B, MAACH A, BENNANI S. The scalability of the hybrid protocol in wireless mesh network IEEE 802.11s[A]. Proceedings of the 2009 Mediterranean Microwave Symposium[C]. Tangiers, Morocco, 2009.1-7.
- [8] LEI Y, QIAN L, WEI L, *et al.* Contention aware airtime cost metric for hybrid wireless mesh protocol[A]. Proceedings of the 2007 Global Mobile Congress(GMC'2007)[C]. Shanghai, China, 2007.260-266.
- [9] KIM J, CHUNG S, LEE Y. Design and implementation of a WLAN mesh router based on multipath routing[A]. Proceedings of the International Conference on Information Networking 2011(ICOIN 2011)[C]. Kuala Lumpur, Malaysia, 2011.154-159.
- [10] SON Y, LEE S, KO Y, *et al.* Session-oriented adaptive routing for improving path stability in WLAN based mesh networks[A]. Proceedings of the 13th International Conference on Advanced Communication Technology: Smart Service Innovation through Mobile Interactivity(ICACT)[C]. Gangwon-Do, Korea, 2011.123-126.
- [11] PACK S, JUNG H, KWON T, *et al.* A selective neighbor caching scheme for fast handoff in IEEE 802.11 wireless networks[A]. Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Communications[C]. Seoul, 2005.3599-3603.
- [12] 李方敏, 韩屏, 罗婷. 无线传感器网络中结合分组丢失率和 RSSI 的自适应区域定位算法[J]. 通信学报, 2009, 30(9):15-23.
LI F M, HAN P, LUO T. Adaptive area location algorithm combining with packet lost rate and RSSI in wireless sensor networks[J]. Journal on Communications, 2009, 30(9):15-23.
- [13] 方旭明, 孙淑杰, 何蓉. 一种 802.11s 无线 Mesh 网络快速切换方案[J]. 西南交通大学学报, 2010, 45(5):726-731.
FANG X M, SUN S J, HE R. 802.11s based fast transition scheme for wireless mesh network[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2010, 45(5):726-731.

作者简介：



游波 (1983-), 男, 重庆人, 中国科学院微电子研究所博士生, 主要研究方向为无线 mesh 网络路由协议和 IEEE 802.11s。



阎跃鹏 (1963-), 男, 陕西西安人, 博士, 中国科学院微电子研究所研究员、博士生导师, 主要研究方向为电子电路、移动通信及无线网络。