

无线 Mesh 网在城市轨道交通车地通信系统中的研究

刘晓娟, 姚文瑞

(兰州交通大学 电子与信息工程学院, 兰州 730070)

摘要: 无线 Mesh 网因组网灵活、支持范围大和移动性强等特点,使其在城市轨道交通(城轨)中具有很好的应用前景。尝试将无线 Mesh 网技术应用于城轨车地通信系统中,针对车地通信存在的越区切换问题,提出了一种基于车载 MMS(mobile Mesh station)位置触发的越区切换方案,利用 OPNET 对组网方案和切换方案进行了仿真。仿真结果表明,无线 Mesh 组网方案性能优于传统 WLAN 组网方案性能,切换方案能有效降低时延并避免了假切换和乒乓切换的发生。

关键词: 城市轨道交通; 无线网状网; 车地通信; 越区切换; OPNET

中图分类号: TP393 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2012)12-4723-03

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.12.083

Research on wireless Mesh network in train-ground communication system of urban mass transit

LIU Xiao-juan, YAO Wen-ru

(School of Electronics & Information Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: The wireless Mesh network has a broad application prospects in urban mass transit with advantages that flexible networking, a large coverage area and good mobility. This paper applied the wireless Mesh network to the mobile communication environment of urban mass transit. And it proposed a triggered by location based handover scheme and simulated to solve the handoff caused when the train moving along the track. Then, simulated networking solutions and handover scheme of this paper with OPNET. Simulation results show that the performance of Mesh network is better than that of WLAN network and the handover scheme of this paper reduced the interruption time in the handover process effectively and prevented erroneous handover or ping-pong handover.

Key words: urban mass transit; wireless Mesh network(WMN); train-ground communication; handoff; OPNET

0 引言

无线网状网(WMN)是基于 WiFi 技术而发展出来的一种新型无线局域网解决方案,是近几年国内外无线技术领域最重要的研究热点之一。现今,WMN 对很多应用来说都是一种非常有前途的无线网络,如带宽带家居网络、小区网络、企业网络和交通网络等。例如,2010年7月在韩国首尔地铁完成并正式运行的全球首个实时宽带移动无线视频地铁监控系统就采用了 Firetide 无线网状网技术和产品。与传统的交换式网络相比,WMN 去掉了节点之间的布线需求,但仍具有分布式网络所提供的冗余机制和重新路由功能,它可以自动进行自我配置,并确定最佳的多跳传输路径。添加或移动设备时,网络能够自动发现拓扑变化并自动调整通信路由,以获取最有效的传输路径。

1 无线网状网的定义及特点

与传统的 WLAN 不同,无线网状网符合 IEEE 802.11s 标

准,其核心是任何无线设备节点都可以同时作为接入点和路由器,网络中的每个节点都可以发送和接收信号,每个节点都可以与一个或者多个对等节点进行直接通信。因此,无线网状网也被称为多跳网络。其基本网络架构如图 1 所示。IEEE 802.11s 协议草案定义了 ESS Mesh 网络中四种不同的节点:

a)MP(Mesh point)。与其他相邻 MP 建立通信链路,参与 ESS Mesh 网络服务。

b)MAP(Mesh access point)。拥有 MP 所有的功能,并提供接入功能。

c)MPP(Mesh portal point)。数据在 Mesh 网络与其他网络间进出的节点。

d)STA(station)。通过 MAP 与 Mesh 网络通信,通常指传统的 IEEE 802.11 用户终端。

利用无线 Mesh 网络设备建立的无线网络系统,完全消除了通常无线网络所谓必须有中心接入点的布局限制(该局限的最大弊端是如果中心接入点失效,将导致其覆盖区域的整个网络瘫痪)。当任何一个节点的网络设备出现故障而失效时,

收稿日期: 2012-05-15; 修回日期: 2012-06-23

作者简介: 刘晓娟(1964-),女,甘肃人,教授,博士,主要研究方向为铁路运输调度指挥与控制系统、城市轨道交通智能控制系统和智能交通与信息系统工程;姚文瑞(1987-),女,河南人,硕士研究生,主要研究方向为城市轨道交通智能控制系统和智能交通与信息系统工程(597482844@qq.com)。

网络会自动重新建立路由体系,保证网络畅通,因而可以大大提高整体网络的可靠性。无线网状网与无线局域网性能对比如表 1 所示。

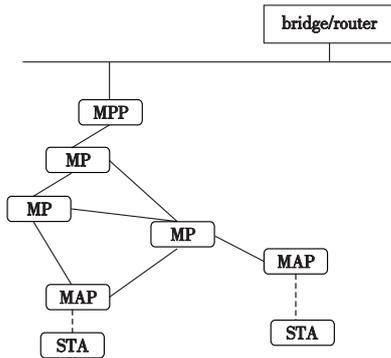


图1 无线Mesh网络架构

表 1 WLAN 与 Mesh 性能对比

对比项	WLAN	Mesh
覆盖距离	室内 100 m, 室外 300 m (空旷地带)	室内 100 ~ 200 m, 室外 300 m ~ 3 km (空旷地带)
移动性	小于 50 km/h	50 ~ 350 km/h
传输带宽	22 Mbps(TCP)	3 ~ 22 Mbps
抗干扰能力	弱	强
无线网络性能	由于节点间无协商机制, 再多节点也无法形成高质量无线覆盖网络, 盲区众多, 切换延时大	节点间存在协商机制, 可以形成高质量无线覆盖网络, 可消除盲区, 切换时延小

相对于 WLAN, 无线 Mesh 在组网方式、传输距离以及移动性上都有很大的改进, 特别是它具有兼容 WiFi 的特性。利用 WiFi-Mesh 和 WLAN 的特点, 在组网时, 可以利用 WiFi-Mesh 作为骨干传输, 同时用 WLAN 作为接入, 做到相互补充。

2 无线 Mesh 城轨移动通信架构

无线 Mesh 网络综合了 WLAN 与移动 Ad hoc 网络的特点, 使其具有很多适用于城轨车地通信环境中的优点。另一方面, 城轨车地通信特殊环境有其固有的特点, 如网络拓扑结构呈线状或交叉线状、基本网络拓扑结构相对固定、要求实现快速接入和快速切换等。本文尝试将无线 Mesh 网络针对车地通信系统加以适当的改进, 使其更好地应用在城轨车地通信系统中。

图 2 是本文采用的基于无线 Mesh 网络的车地通信系统示意图。根据 IEEE 802. 11s 草案中定义的无线 Mesh 网络节点和无线 Mesh 网络设备在车地通信系统中的不同应用, 将车地通信无线 Mesh 网络设备分为三类^[1], 即 MMS (Mesh mobile station)、MAP 和 MPP。其中, MMS 称为 Mesh 移动终端或者 Mesh 车载终端, 为多模 Mesh 设备^[2], 随车一同移动接入 Mesh 主干网, 并负责向车厢内网络用户提供标准终端接入网服务; MAP 为 Mesh 网接入点, 为单模 Mesh 设备^[2], 它沿铁路线布置构建 Mesh 主干网络, 并同时提供 MMS 移动接入服务和标准终端接入服务; MPP 为 Mesh 网关节点, 它用来连接无线 Mesh 网和车站专用有线网络或公共有线网络。列车上的网络用户用 IEEE 802. 11b/g 无线标准终端设备接入由随车运行的 MMS 所组织的车厢局域网, 再通过 MMS 移动接入 Mesh 主干网; 最后通过 Mesh 主干网与公共互联网络连接。

由 MAP 和 MPP 组成的、相对固定的沿铁路线的覆盖网络

被称为车地通信无线 Mesh 主干网或车地通信无线 Mesh 上层网络, 它能够为遵循 IEEE 802. 11b/g 协议标准的终端用户提供接入服务, 同时还能够为遵循 IEEE 802. 11s 协议标准的 MMS 提供移动接入服务; 另一方面, 遵循 IEEE 802. 11s 协议标准的 MMS 和遵循 IEEE 802. 11b/g 协议标准的终端用户则被称为车地通信无线 Mesh 下层网络。

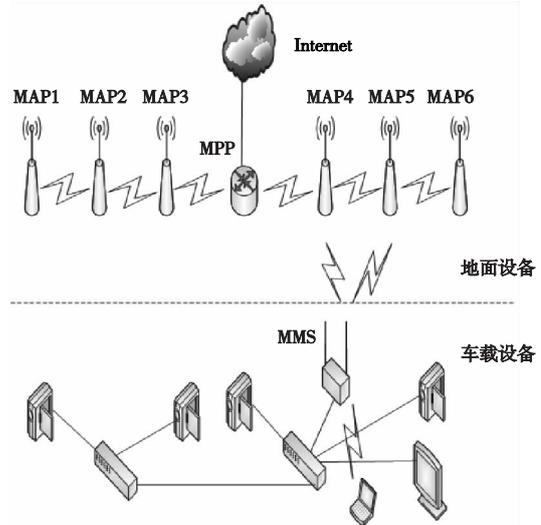


图2 基于Mesh的城轨移动通信系统

整个系统是一个支持语音、数据、视频的融合有线和无线的网络, 对业务有良好的 QoS 支持, 并且具备运营所需的稳定性和可靠性。沿线的 MAP 可经过单跳或多跳方式通过多级交换机或路由器连接到视频监控中心和地铁网络服务器; 车载设备如视频监控摄像机、视频监视器、车载 MMS 可以通过一个交换机或路由器经过 Mesh 无线网络传输数据。

3 基于 MMS 位置触发的切换方案

目前, 对于 WLAN 越区切换的研究主要通过改进切换算法来减少切换中断时间, 而很少关注切换频率和假切换概率。CBTC 系统中无线局域网的工作环境、网络拓扑和通信参数的特殊性也使得大多数结论不适用。

在无线 Mesh 网络中, 因为单个 MAP 的覆盖范围有所增大, 所以沿线 MAP 数量可以有所减少, 进而降低了切换频率。但为了防止通信漏点, 轨道沿线布置的 MAP 之间仍要有一定的重叠区。

在城市轨道交通车地通信系统中, 每个 MAP 是沿着轨道线的位置确定分布的。也就是说, 当列车高速移动经过轨道沿线的各 MAP 时, 车载 MMS 的移动方向是确知的, 在移动中发生切换关联的 MAP 也是确定的, 即沿着列车轨道沿线方向上移动的下一个 MAP 就是将要切换连接的 MAP。因此其切换算法可以大大简化并进行优化, 从而避免乒乓切换以及假切换^[3]等事件的发生。

按照 CBTC 系统的要求, 列车定位的精度在 5 ~ 10 m 内, 而实际系统的列车定位精度还要更高。因此, 为了减少衰落信道的随机性可能造成的错误切换和乒乓切换, 本文提出一种基于车载 MMS 位置触发的城市轨道交通车地通信系统的切换机制。具体流程如图 3 所示。

当列车运行时, 周期性地发送探测请求帧, 接收到探测请求帧的所有 MAP 都回应探测响应帧, 列车上的 MMS 根据接收到的探测响应帧的信号质量判断下一个目标 MAP 的工作状态

是否正常,并且提前与下一个 MAP 完成频率和时间上的同步。为了能在切换前完成与目标 MAP 的同步,移动台应在离切换前尽可能近的时刻接收到目标 MAP 发送的探测响应信号以进行同步,这就要求移动台以较小的周期发送探测请求帧。CBTC 系统中业务量比较小,列车控制信息和列车位置信息通常以 200 ~ 500 ms 的周期发送,一个 CBTC 业务的吞吐量通常不超过 1 Mbps,并且通常一个 MAP 下接入用户不超过两个,因此移动台频繁进行探测请求信息发送不影响 CBTC 车地通信系统的性能。

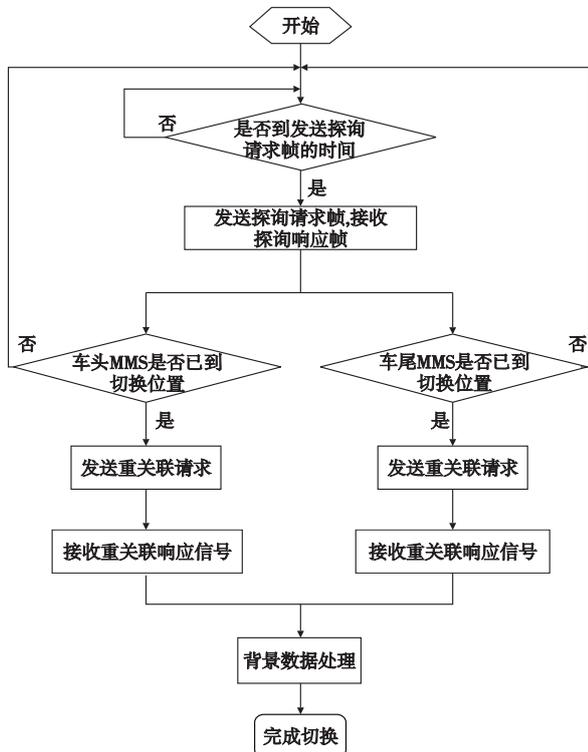


图3 基于MMS位置触发的切换流程

与相邻 MAP 完成同步后,不像目前已经研究过的各种切换机制,移动台不再以接收到 MAP 响应信号的信号质量等状态信息作为触发切换的条件,而是车载 MMS 的位置已经运行到了切换点才触发切换。这样,基于位置的切换可以进一步消除因为信道快速变化引起的误切换和乒乓切换等现象发生。

4 方案性能比较

基于图 4 中的场景,本文选取 OPNET 建立仿真模型,首先对 Mesh 组网方案和 WLAN 组网方案进行了仿真比较,然后对本文提出的切换方案和已有的切换方案进行了性能分析与比较。

仿真模型是由通信对端主机 CN 和 11 个 MAP 以有线或无线的方式与 MPP 相连。有线带宽为 100 Mbps,无线 IEEE 802.11 部分的带宽为 11 Mbps。所有有线链路采用全双工的工作方式,移动节点 MMS 作为数据包的接收端,通信对端主机 CN 作为数据的发送端,包的大小为 1 024 Byte。设 MMS 运动轨迹按照图 4 所示以 2 m/s 的速度沿直线运动,依次经过各个 MAP。

4.1 组网性能比较

按照图 4 的场景布置,仿真范围为 300 m × 300 m,MAC 层采用 IEEE 802.11 协议,在节点固定和相同负载的情况下,选

取了端到端时延 (delay) 和吞吐量 (throughput) 两个方面进行比较。端到端时延是指将数据包从源节点发送到目的节点所需要的延迟时间,吞吐量指单位时间内传输的数据量。对照结果如图 5、6 所示。

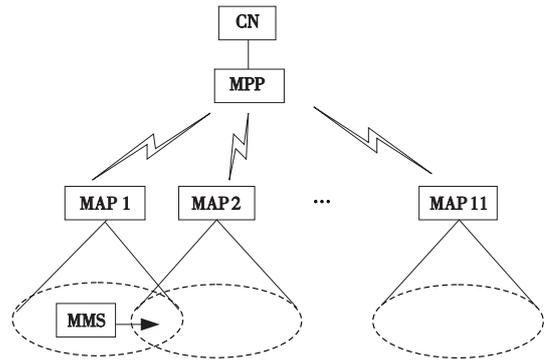


图4 仿真网络拓扑

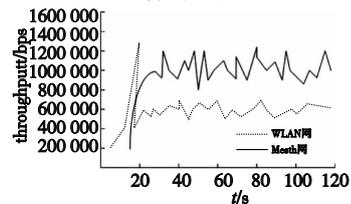


图5 WLAN网与Mesh网吞吐量比较

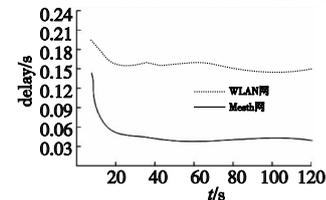


图6 WLAN网与Mesh网端对端时延比较

比较结果表明,在相同的负载条件下,Mesh 网络的吞吐量大于 WLAN 的吞吐量,Mesh 网络的时延小于 WLAN 的时延。

4.2 切换性能比较

基于车载 MMS 位置触发的切换方案中由于提前获得了下一个 MAP 的信息并完成了与下一个 MAP 的频率和时间上的同步,MMS 在切换开始时就不需要再发送探测请求信号,切换的过程减少了扫描过程。在这种情况下切换时延就只有重关联时延。因此,假设不发生碰撞,重关联请求从发送到 MAP 接收的时延为

$$T_R = \delta + aDIFSTime + aCCATime + T_T + T_p + T_L + (T_b \times aSlotTime)$$

其中: δ 为传输时延; T_b 为每次数据发送前随机回退的时隙数,是一个在 $(0, aCW_{min})$ 区间均匀分布的随机变量; $aSlotTime$ 是时隙长度; $aDIFSTime$ 为数据发送帧间隔; $aCCATime$ 为每次发送前侦听信道需要的时间; T_T 为接收到发射的转换时延; T_p 为前导码时延; T_L 为 PLCP 帧头时延; aCW_{min} 为初次竞争窗的大小,即移动台在数据发送前为避免碰撞随机退避的窗口大小。

同样按照图 4 的场景布置,分别对硬切换、平滑切换和本文提出的切换方案进行了仿真。三种方案切换时延对比如图 7 所示。

因为基于 MMS 位置触发的切换方案不需要在切换开始时扫描信道,所以切换时延相对较小。另外,移动台在当前 MAP 覆盖的小区范围内进行移动时,由于信道衰落的随机性的影响,在某些时刻接收自相邻 MAP 的信号强度会超过当前 MAP 的接收信号强度。假设来自邻居 MAP 的 (下转第 4728 页)

之间的欧式距离 D , 将 D 按从小到大排序, 选取 D 最小的前 N 个相似点的经纬度值进行平均, 得到定位结果, 分析定位结果的误差 $Error_i (0 \leq i \leq 6)$, 得到合理的 I 值选择方法。

5 结果分析

实验中, 采用两个测试移动台分别作为主叫和被叫, 沿特定的网格进行路测, 存储数据的 LOG 文件。路测数据线路如图 2 所示。相隔一段时间后, 选取部分路线再次进行路测。通过解析相应数据的 LOG 文件, 得到实验数据。



图2 用于建立指纹数据库的数据

图 3 比较了参数 I 取值变化时, 基于 RSS 空时处理的指纹定位算法的误差结果。由仿真结果可知, 选择主服务小区相同 ($I \geq 0$), 不考虑邻小区的情况下, 在 200 m 精度范围内, 准确度能达到 67%; 当选择相同邻小区的个数 $I \geq 4$ 时, 在 100 m 精度范围内, 准确度能达到 67%, 相比于文献 [2, 3] 中的算法, 在满足同等精度的情况下, 避免了算法的复杂性。

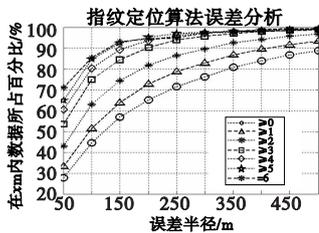


图3 参数 I 的选择对基于 RSS 空时处理的指纹定位结果的影响

(上接第 4725 页) 接收信号强度高于来自当前 MAP 的接收信号强度就触发切换的话, 则可能会导致 MMS 发生假切换或乒乓切换。而采用基于 MMS 位置触发的切换方法, 则能有效避免假切换和乒乓切换的发生。

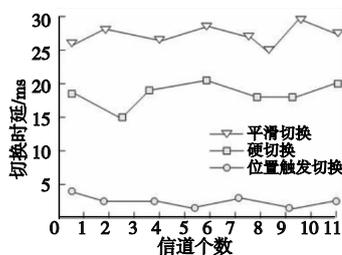


图7 三种方案的切换时延比较

5 结束语

本文研究了无线 Mesh 网在城轨车地通信系统中的应用, 设计了基于无线 Mesh 的城轨车地通信架构。仿真结果表明, 无线 Mesh 组网方案比传统的 WLAN 组网方案有较高的吞吐量和较小的端到端延时。针对车地通信存在的越区切换问题, 本文根据新型组网方案的特点, 提出了基于车载 MMS 位置触发的切换方案, 与传统的以接收到的 AP 信号质量等状态信息作为触发条件的切换方案相比, 该方案有效避免了假切换和乒

6 结束语

本文研究的基于 RSS 空时处理的指纹定位算法也可应用于 3G 和 LTE 等具有蜂窝网络结构的系统中, 但指纹数据库需随环境的改变而变化。该算法利用实际无线环境建立指纹数据库, 在不增加系统负担和避免算法复杂性的条件下, 能满足实际定位。

参考文献:

- [1] SIMIC M, PEJOVIC P. An algorithm for determining mobile station location based on space segmentation [J]. *IEEE Communications Letters*, 2008, 12(7): 499-501.
- [2] WIJESINGHE P, DIAS D. Novel approach for RSS calibration in DCM-based mobile positioning using propagation models [C]//Proc of the 4th International Conference on Information and Automation for Sustainability, 2008: 29-34.
- [3] 王浩, 王芙蓉, 李可维, 等. 移动通信网络 MR 帧解析及信号指纹定位方法 [J]. *计算机工程与应用*, 2009, 45(17): 16-18.
- [4] JUURAKKO S, BACKMAN W. Database correlation method with error correction for emergency location [J]. *Wireless Personal Communications*, 2004, 30(2-4): 183-194.
- [5] 柴炜晨, 毛京丽. GSM 网络的一种实用定位技术 [J]. *计算机与信息技术*, 2010, 17(1): 1-4.
- [6] CHEN M Y, SOHN T, CHMELE D, et al. Practical metropolitan-scale positioning for GSM phones [C]//Proc of the 8th International Conference on Ubiquitous Computing. Berlin: Springer-Verlay, 2006: 225-242.
- [7] 高鹏, 周胜, 涂国防. 一种基于路测数据的传播模型校正方法 [J]. *华中科技大学学报: 自然科学版*, 2010, 38(3): 72-75.
- [8] 戴文华, 焦翠珍, 何婷婷. 基于并行遗传算法的 K-means 聚类研究 [J]. *计算机科学*, 2008, 35(6): 171-174.

乓切换的发生。仿真结果表明, 本文所提出的切换方案可以将延时降到 5 ms 以内, 甚至更短, 能够满足城市轨道交通高速移动环境下车地通信的要求。

参考文献:

- [1] 程谦云. 基于无线 Mesh 网络的移动车地通信技术研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2009.
- [2] 刘支援. 无线网状网在城轨交通中的应用 [J]. *信息化研究*, 2010.
- [3] 余海, 曹蕾. 基于 WiFi 的无线网状 (Mesh) 组网技术 [J]. *现代电子技术*, 2011, 34(10): 120-122.
- [4] JIANG Hai-lin, ZHAO Hong-li, ZHAO Bo-bo. A novel handover scheme in wireless LAN in CBTC system [C]//Proc of IEEE International Conference on SOLL. 2011: 473-477.
- [5] XU Dong-wang, AMAN O L. IEEE 802. 11s wireless Mesh networks-framework and challenges [J]. *Ad hoc Networks*, 2008, 6(6): 970-984.
- [6] ZHANG Li-li, WANG Hui-bin, XU Li-zhong, et al. Fault tolerance and transmission delay in wireless Mesh networks [C]//Proc of International Conference on Networks Security, Wireless Communications and Trusted Computing, 2009: 193-196.
- [7] 陈敏. OPNET 网络仿真 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [8] 刘春艳. 无线 Mesh 网络的建模与仿真分析 [D]. 重庆: 重庆大学, 2010.