

DOI: 10.13382/j.jemi.2015.08.005

# 基于信标同步及信道预测的井下无线网络切换机制研究\*

魏振春<sup>1 2</sup> 郭 令<sup>1</sup> 石 雷<sup>1</sup>

(1. 合肥工业大学计算机与信息学院 合肥 230009; 2. 安全关键工业测控技术教育部工程研究中心 合肥 230009)

**摘 要:** 矿井机车无人驾驶系统面临的一个主要问题是车载移动节点 MN 在机车轨旁 AP 间进行切换产生的通信延时问题。传统切换机制扫描所有信道, 时延过大, 难以满足系统通信的实时性要求。因此建立井下 802.11 无线网络模型, 提出基于信标同步及信道预测的井下无线网络切换机制, 该机制通过同步 AP 信标帧的广播时间和维护 AP 邻接链表的方法减少切换延时。通过仿真实验验证该机制能够将切换时延降到实时通信系统的要求, 对比传统硬切换机制可降低切换时延达 70% 以上。

**关键词:** 矿井机车无人驾驶系统; 信标同步; 切换机制; 信道预测

中图分类号: TN919.72; TP393.17 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510

## Handoff mechanism of underground mine wireless network based on beacon synchronization and channel estimation

Wei Zhenchun<sup>1 2</sup> Guo Ling<sup>1</sup> Shi Lei<sup>1</sup>

(1. School of Computer and Information, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. Engineering Research Center of Safety Critical Industry Measure and Control Technology of Ministry of Education, Hefei 230009, China)

**Abstract:** A major problem of achieving mine locomotive unmanned system is the communication delay caused by the MN in mine laneway moving from one access point to another one. The traditional handoff mechanism which has probed channels by full-scan method causes high handoff delay and can't meet the requirement of real-time network traffic. So the model of underground mine wireless network is established and beacon synchronization and handoff mechanism of underground mine wireless network based on beacon synchronization and channel estimation is presented to reduce the channel staying time and the number of scanned channels with the way of beacon synchronization and neighbor list of APs. The simulation validates that the delay of the mechanism could be reduced to satisfy the requirement of real-time communication system and reduces at least 70% of the handoff delay than hard handoff mechanism.

**Keywords:** mine locomotive unmanned system; beacon synchronization; handoff mechanism; channel estimation

## 1 引 言

矿井安全生产事故造成了惨重的生命代价、经济损失和恶劣的社会影响。矿井运输事故占生产事故的 30%, 因此减少人工操作矿井机车、实现矿井机车无

人驾驶系统具有重大意义。在矿井机车无人驾驶系统中, 机车需要实时采集高清视频信号及状态环境信息上传至地面控制中心, 因此需要解决移动机车与固定网络通信问题。目前移动网络如 3G、4G 由于带宽限制难以满足系统需求。基于 802.11 的无线局域网技

收稿日期: 2015-01 Received Date: 2015-01

\* 基金项目: 国家国际科技合作专项(2014DFB10060)、国家自然科学基金(61370088)、安徽省高等学校省级自然科学研究(KJ2013ZD09)项目

术<sup>[1]</sup>由于其高带宽、组网灵活、标准开放等特点使实现矿井机车的无人驾驶成为可能。

由于 802.11 设计之初是面向室内场景使用的,其接入点(access point, AP)信号覆盖的范围有限。所以需要沿机车轨道布设多个 AP 来实现车载移动节点(mobile node, MN)与地面网络通信,为保证通信连续不间断, MN 需要在 AP 间不停地切换。传统的 AP 切换采用硬切换机制<sup>[2]</sup>,即 MN 先与当前 AP 断开连接,扫描到符合条件的 AP 后再与之建立连接,显然这种方式会造成较大通信时延,而实时性通信任务要求将时延控制在 50 ms 内<sup>[3-4]</sup>,因此传统切换机制不能直接用于矿机车无人驾驶系统,否则会出现极其惨重的后果。

为了降低切换时延,部分学者做了相关研究。邻居图算法<sup>[5-6]</sup>,即 MN 根据获取的邻居图中的 AP 信息,只扫描当前关联 AP 的邻居 AP,减少扫描信道以及扫描 AP 的数量,从而减少了扫描时延。但邻居图算法未考虑网络负载情况以及 MN 运动方向,会造成乒乓切换,降低切换的效率。MultiScan 算法<sup>[7]</sup>利用两个无线物理网卡,一个用于数据传

输,一个用于 AP 切换,该算法能够实现无缝切换降低切换延迟,但需要增加无线物理接口并且无线物理接口之间会存在信号干扰问题。

本文建立了井下 802.11 无线网络模型,解决机车移动通信问题;提出基于信标同步及信道预测的井下无线网络切换机制,该切换机制对 AP 和 MN 进行时间同步,减少单信道扫描时间,结合矿井机车的运行方向以及 AP 的历史切换信息预测下一最佳切换 AP,最终达到降低切换时延的目的。

## 2 802.11 切换原理

随着 MN 的移动,周围 AP 的信号强度不断变化。当 MN 从一个 AP 向另一个 AP 移动时,前者的信号强度不断减小而后者的信号强度变强,当前者的信号强度降低到一定范围内时, MN 必须从前者切换到后者才能保证正常通信。切换包括 MAC 层切换和网络层切换<sup>[8]</sup>, WLAN 内只发生 MAC 层切换, MAC 层切换包括扫描、认证和重关联 3 个阶段<sup>[9]</sup>,切换过程如图 1 所示。

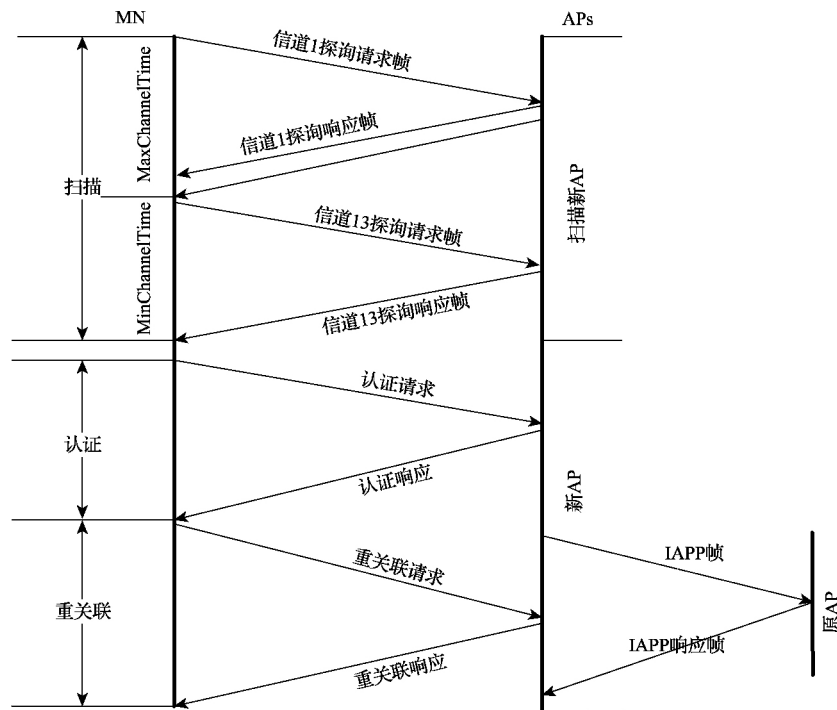


图 1 MAC 层切换过程

Fig. 1 MAC layer handoff process

信道扫描有两种模式:主动扫描和被动扫描。在主动扫描中, MN 主动向每个信道广播探测请求

帧,接收到该探测请求帧的 AP 会返回相应的探测响应帧,主动扫描的时间可以用式(1)来表示:

$$T_{scan} = \sum_{i=1}^N (T_{switching} + T_{broadcast(i)} + T_{waiting(i)}) \quad (1)$$

式中: 广播探测请求帧时间  $T_{broadcast(i)}$  太小可以忽略不计。信道等待时间  $T_{waiting(i)}$  由  $MinChannelTime$  和  $MaxChannelTime$  决定。如果当前扫描的信道为空信道则等待时间  $T_{waiting(i)}$  取值  $MinChannelTime$  ,如果当前扫描的信道不空时则等待时间取值  $MaxChannelTime$  。一般设置  $MinChannelTime$  为 7 ms , $MaxChannelTime$  为 11 ms 。

在被动扫描中 ,MN 接收 AP 周期性广播的信标帧 ,获取接入 AP 的基本网络参数 ,然后选择信号强度最佳的 AP 作为新接入的对象。通常被动扫描的时延将达到 1 s ,所以这种方式很难应用于实时系统中。但是采用 NTP( network time protocol) 机制将系统内 AP 和 MN 进行时间同步 ,使处于同一信道的 AP 同一时刻广播信标帧 ,而 MN 可以在此时刻去监听信标帧 ,这样可以将  $T_{waiting(i)}$  进一步减小<sup>[10]</sup> ,而且减少了广播探测请求帧的时间。

认证阶段: 经过扫描阶段确定出最佳的候选 AP ,为了保证无线链路的安全 ,AP 需要完成对 MN 的认证才能进入重关联阶段。

重关联阶段: MN 要接入无线网络 ,需要向候选 AP 发送重关联请求 ,AP 处理请求并做出响应。

在传统的硬切换机制中 ,扫描阶段采用全扫描方式 ,占总切换延时的 90% 以上<sup>[11]</sup> ,因此减少扫描阶段时延至关重要。

### 3 机车无人驾驶系统网络模型

IEEE802.11 2.4 GHz 频段共有 14 个信道可用 ,总的频宽为 83.5 MHz ,无法容纳 13 个不重叠的 22 MHz 的信道 ,最多提供 3 个互不交叠的信道。

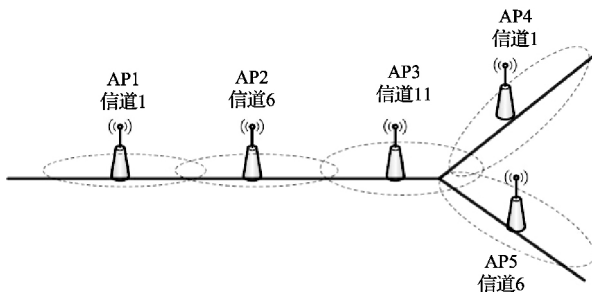


图 2 轨道 AP 布设方式

Fig. 2 The layout of access points along the track

为了降低矿井巷道中 AP 间的信号相互干扰 ,相邻 AP 使用互不交叠的通信信道 ,可以按照 AP

的 ID 依次设置 AP 的信道分别为 1、6、11。每个 AP 的位置固定并且位置信息、ID 信息以及信道信息保存在控制中心的数据库中。轨旁 AP 可按照图 2 所示方式布置 ,为保证切换的进行 ,相邻 AP 信号覆盖范围相互重叠。增加 AP 布置的密度可在单个 AP 出现故障时防止通信中断。

如图 3 所示为矿井机车无人驾驶系统的网络模型 ,每个 AP 与其信号覆盖范围内关联的 MN 组成一个基本服务集(BSS) ,每个 BSS 有一个基本服务集识别码( BSSID) 来唯一标识。将一个或多个 BSS 通过分布式系统( DS) 连接起来构成一个扩展服务集( ESS) ,如网关 1、AP1、AP2 和 MN 组成一个 ESS ,每个 ESS 有一个扩展服务集识别码( ESSID) 来唯一标识。ESS 内的切换属于 IEEE802.11 的 MAC 层切换 ,本文讨论的即是 MAC 层切换。DS 一般为交换机或路由器等能连接多个子网的网络构件 ,每个 DS 连接到光纤 ,并通过 Intranet 连接至地面控制中心的服务器。同步监听机制需要使系统内的所有 AP 同步广播信标帧 ,需要对 AP 和 MN 进行时间同步 ,所以系统内需要一台 NTP 服务器。

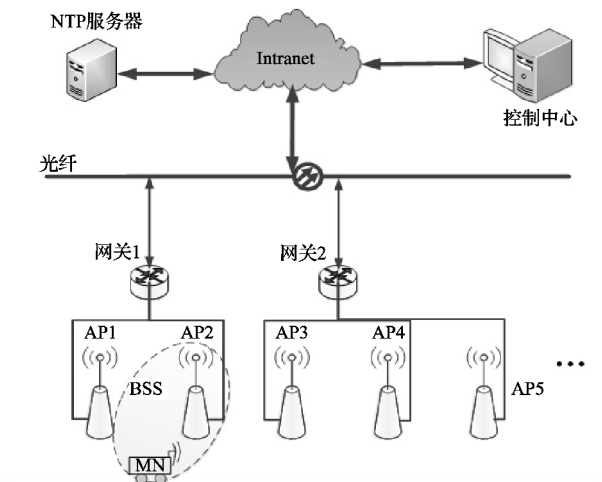


图 3 矿井机车无人驾驶系统的网络模型

Fig. 3 The network model of mine locomotive unmanned system

### 4 基于信标同步及信道预测的井下无线网络切换机制

#### 4.1 信标同步监听机制

基于 802.11 协议的 AP 节点周期性的广播信

标帧,用以与 MN 同步状态信息维持连接。文献 [9] 提出了同步扫描算法,利用 AP 信标广播周期的可配置性来同步所有 AP 的信标广播时刻,MN 只要在信标消息产生前切换到相应信道即可快速侦听到 AP 信息,减少信道驻留时间。

信标同步监听机制利用交错发送方法来避免不同信道信标消息的相互干扰。例如所有 AP 广播信标帧的周期为  $T$ ,则信道 1 在  $t, t+T, t+2T, \dots$  时刻发送信标帧,而信道 2 则可以在  $t+d, t+T+d, t+2T+d, \dots$  时刻广播信标帧,依此类推信道  $n$  可在  $t+(n-1) \cdot d, t+T+(n-1) \cdot d, t+2T+(n-1) \cdot d, \dots$  时刻广播信标帧,信标帧广播如图 4 所示。而如果网络中 AP 信道是互不交叠的,则可在同一时刻广播信标帧而不用担心信号相互干扰。该机制扫描单个信道产生的时延计算如式(2)。

$$SyncprobeDelay = SwitchDelay \cdot 2 + WaitTime \quad (2)$$

式中:  $SwitchDelay$  是信道切换时间,  $WaitTime$  是在信道上的驻留时间,在本文提出的网络模型中  $WaitTime$  不超过主动扫描中的  $MaxChannelTime$ , 因此减小了单信道扫描时间。处于同一信道不同 AP 广播的信标帧可能造成冲突,因此同一信道 AP 广播信标帧可以在某窗口内随机发送。

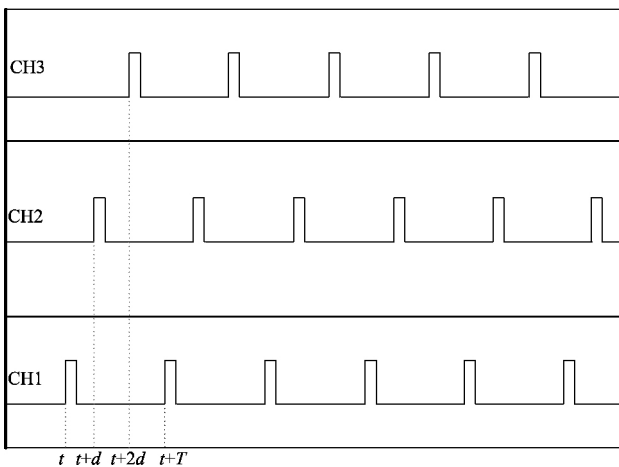


图 4 信标帧同步

Fig. 4 Beacon frame synchronization

AP 和 MN 时间同步的精确度直接决定信标同步机制信道扫描的性能。现有的企业级 AP 支持时间同步协议<sup>[12-14]</sup>,而在局域网内布置的 NTP 服务器可以将时间同步的精确度准确到  $100 \mu s$  级别,满足需求。由于信标同步监听机制没有考虑到

矿井机车轨旁网络情况、MN 移动方向,且使用全扫描方式扫描信道,为进一步减少信标同步监听机制扫描信道数、防止乒乓切换,本文提出了信道预测机制。

### 4.2 信道预测机制

信标同步监听机制仅仅是减少单信道扫描时的信道等待时间并没有考虑到周边 AP 布置情况,当周围 AP 较多或者需要扫描的信道较多时,其造成的时延依然会很大。为进一步减少切换时延,引入了信道预测机制。该机制利用 AP 的历史切换信息、MN 移动方向和 MN 与备选 AP 之间的距离来预测最有可能切换的 AP, MN 行驶方向信息是 MN 在轨道岔路口变道的决定因素,而历史切换信息和距离信息是 MN 直线行驶时切换的主要参考。因此为系统建立邻接链表,如图 5 所示,系统中共有  $m$  个 AP,其中 AP1 有两个邻居节点 AP2 和 AP3, MN 可以从 AP1 切换到 AP2 或者 AP3。

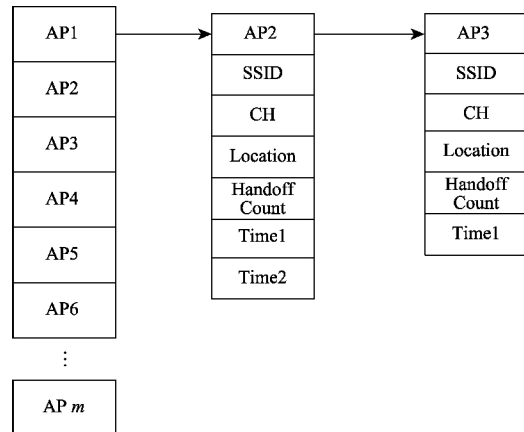


图 5 邻接链

Fig. 5 Adjacency list of APs

每个表节点中保存 AP 节点信息,包括 SSID、信道、AP 位置信息、近期切换到该 AP 的次数、每次切换到该 AP 的时间,如图 6 所示。

AP ID	SSID	CH	Location	Handoff Count	Time1	Time2	...

图 6 表节点信息

Fig. 6 Format of adjacency list's node

$HandoffCount$  为在近期切换到该 AP 的次数,  $Time1, Time2, \dots$  表示每次的切换时间。统计近期一段

时间内的切换次数的作用在于,当 MN 经常变换轨道时该机制可以尽早的预测出准确 AP。而对新 AP 的预测综合考虑了切换到邻接 AP 的次数  $HandoffCount$ 、邻接 AP 与 MN 坐标信息构成的向量与服务器下发的方向向量夹角  $\alpha_i$ 、MN 与 AP 的距离  $L_i$ 。切换到第  $i$  个邻接 AP 的预测权值计算如式(3)。

$$W_i = \delta \cdot \frac{HandoffCount_i}{\sum_1^n HandoffCount_i} + \varphi \cdot \frac{(\pi - \alpha_i)}{\sum_1^n (\pi - \alpha_i)} - \varepsilon \cdot \frac{L_i}{\sum_1^n L_i} \quad (3)$$

式中:  $\delta + \varphi + \varepsilon = 1$   $n$  表示共有  $n$  个邻居 AP。当轨道机车需要经常变换运行轨道时  $\varphi$  取值要相对大一点,例如  $\delta, \varphi, \varepsilon$  可分别取值 0.1、0.8、0.1。而当机车轨道长时间使用同一轨道时,即轨道没有岔路时,方向因素可以忽略  $\delta$  的值要相对大一点,例如  $\delta, \varphi, \varepsilon$  可分别取值 0.3、0.4、0.3。

MN 在切换之前需要获得 AP 邻接链表信息、切换向量  $\vec{V}_s$  以及 MN 的位置信息。根据 MN 位置信息和第  $i$  个邻接 AP 的位置信息可以求得向量  $\vec{V}_i$ , 因此可求得  $\alpha_i$ 、MN 与第  $i$  个邻接 AP 的距离  $L_i$ , 如式(4)和式(5)。

$$\alpha_i = \cos^{-1} \frac{|\vec{V}_s \vec{V}_i|}{|\vec{V}_s| |\vec{V}_i|} \quad (4)$$

$$L_i = |\vec{V}_i| \quad (5)$$

因此可以求出所有邻居 AP 的权值,并根据权值对邻居 AP 进行优先级排序。MN 可以利用同步监听机制扫描优先级最高的 AP 所处的信道,若扫描到权值最大的 AP 且其信号强度满足要求则在下一信标周期开始与之进行认证和重关联,若失败则继续扫描下一优先级 AP 信道,直至切换成功。

### 4.3 切换过程

定义 1: 信号强度阈值 (RSSI threshold, RSST) 表示 AP 满足连接要求的最小信号强度值,作为触发阈值。

如图 7 所示为基于同步监听及信道预测的井下无线网络切换机制的具体过程,描述如下:

1) 系统内所有 AP 向服务器上报各自信息(包括位置信息、信标广播时间等)给服务器,服务器根据上传信息建立邻居链表。

2) 系统内所有 AP 和 MN 与 NTP 服务器进行时间同步。MN 在启动之前以全扫描方式连接到第一个 AP。

3) MN 在正常行进过程中定时检测当前关联 AP 的信号强度值 RSSI,如果低于阈值则启动切换。

4) MN 向服务器请求当前关联 AP 的邻居信息,按信道分组,信道优先权由其组内优先权最高的 AP 决定。依据优先权和信标同步机制扫描信道,记录扫描到的信标信息。

5) 若当前扫描到优先权最高的 AP 的 RSSI 满足信号强度阈值,则停止扫描并在下一信标周期启动认证和重关联,否则,若优先权次高的 AP 与之前 AP 不处于同一信道则扫描优先权次高的 AP 所处的信道。

6) 若所有邻居节点所处信道皆已扫描还不能完成切换,则全扫描尚未扫描的信道直至切换完成。

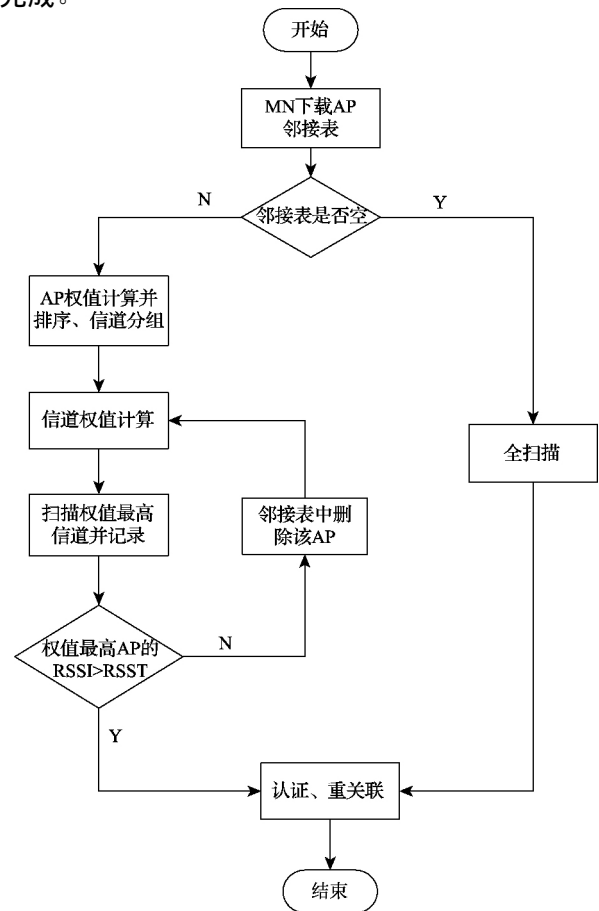


图 7 切换过程

Fig. 7 Process of handoff

## 5 仿真实验

本小节通过仿真实验对比基于信标同步及信道预测的井下无线网络切换机制 (handoff mechanism of underground mine wireless network based on beacon synchronization and channel estimation, HMBBSCE) 与传统的硬切换机制 (hard handoff mechanism, HHM) 的性能, 对使用两种机制所造成的切换时延、丢包率进行分析比较。按照前文图 2 模型所描述的 AP 布设方式布设 5 个 AP 进行仿真, MN 运动轨迹存在一个岔路。使用 OPNET 14.5<sup>[15]</sup> 实现仿真, 仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真配置

参数	值
MN 移动速度	5 m/s
MaxChannelTime	11 ms
MinChannelTime	6.5 ms
信道切换时间	5 ms
AP 覆盖距离	300 m
AP 间距	200 m
网络传输速度	4 Mbps
仿真时间	140 s
WaitTime	6 ms
$\delta: \varphi: \varepsilon$	1: 8: 1

图 8 描述了在仿真时间内 HHM 和 HMBBSCE 数据包的延时对比情况, 横坐标表示仿真进行的时间

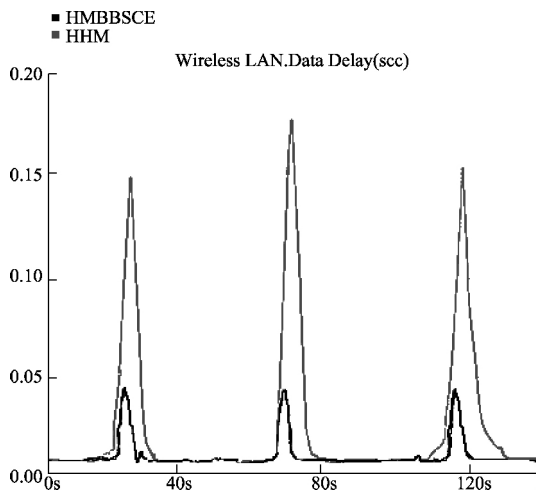


图 8 数据包时延对比

Fig. 8 Comparison of packet delay

间, 纵坐标表示数据包时延。在非切换时刻两种切换时延都较低, 而在切换时刻, 传统硬切换机制 HHM 导致的最大时延高达 150 ms, 主要原因是每次切换扫描信道较多且信道驻留时间较长。而 HMBBSCE 产生的切换时延低于 40 ms, 降低切换时延 70% 以上, 满足系统的通信要求。

图 9 描述了系统中两种切换机制的丢包率对比情况, 通过对比可以看出 HMBBSCE 丢包率维持在较低水平, 受切换过程影响不大, 较为稳定。而 HHM 由于在选择 AP 的时候扫描信道过多、信道驻留时间过长, 是的通信丢包率较高, 特别是在 AP 切换时出现了较大增加, 可能会导致数据传输不稳定。通过仿真结果对比可以看出采用 HMBBSCE 机制的切换时延更低, 通信较为稳定, 系统可靠性会更高。

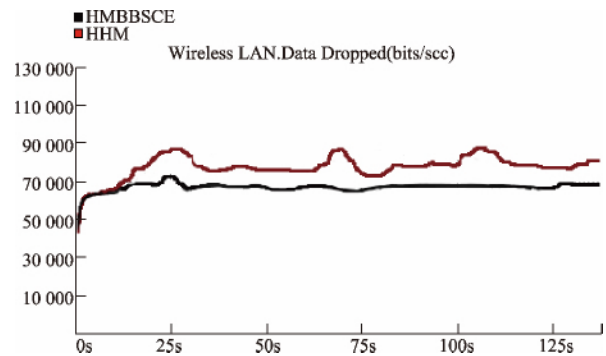


图 9 丢包率对比

Fig. 9 Comparison of dropped data

## 6 结论

本文通过对 802.11 协议切换过程的描述, 重点分析了切换过程中时延的组成, 建立井下 802.11 无线网络模型, 提出了基于同步监听及轨迹预测的井下无线网络切换机制。通过仿真验证表明该机制可以有效减少切换时延以及网络丢包率, 保证切换时延在 40 ms 以内, 满足矿井机车的无人驾驶系统的要求。

### 参考文献

- [1] 张和生, 张明洋, 孙伟. 基于 IEEE 802.11p 高速车路通信环境研究[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(5): 1181-1187.
- ZHANG H SH, ZHANG M Y, SUN W. Research on vehicle to infrastructure high-speed communication

- based on IEEE 802.11p [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(5): 1181-1187.
- [2] VELAYOS H, KARLSSON G. Techniques to reduce IEEE 802.11b MAC layer handover time [C]. IEEE International Conference on Communications, 2004, 7: 34-38.
- [3] KWAK D, MO J, KANG M. Investigation of handoffs for IEEE 802.11 networks in vehicular environment [C]. ICUFN, 2009, 89-94.
- [4] PURUSHOTHAMAN I, ROY S. FastScan: a handoff scheme for voice over IEEE 802.11 WLANs, wireless networks [J]. 2010, 16(7): 2049-2063.
- [5] DEBABRATA S, TAPAS J, TARASANKAR P, et al. Fast handoff mechanism in WLANs based on neighbor graph information [C]. Parallel Distributed and Grid Computing, 2010, 334-338.
- [6] SANGHEON P, HAKYUNG J, TAEKYOUNG K, et al. A selective neighbor caching scheme for fast handoff in IEEE 802.11 wireless networks [C]. Mobile Computing and Communications Review, 2005: 3599-3603.
- [7] BRIK V, MISHRA A, BANERJEE S. Eliminating handoff latencies in 802.11 WLANs using multiple radios: applications experience and evaluation [C]. Proceeding of Fifth ACM SIGCOMM Conf. on Internet Measurement (IMC), 2005: 27-32.
- [8] ZHANG ZH X, RICHARD W, AZZEDINE B. A fast MAC layer handoff protocol for wifi-based wireless networks [C]. Local Computer Networks (LCN), IEEE, 2010, 684-690.
- [9] SANGHEON P, JAEYOUNG C, TAEKYOUNG K. Fast-handoff support in IEEE 802.11 wireless networks [J]. Communications Surveys & Tutorials, IEEE, 2007, 9(1): 2-12.
- [10] RAMANI I, SAVAGE S. Sync-Scan: practical fast handoff for 802.11 infrastructure networks [C]. INFOCOM 2005. 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, 2005, 675-684.
- [11] SUNIL M, RAO S V. Location based fast MAC handoffs in 802.11 [C]. Wireless, Mobile and Multimedia Networks, 2008, 184-187.
- [12] RIECK C. An approach to primary NTP by using the linux kernel [C]. Frequency Control Symposium 21st European Frequency and Time Forum, IEEE, 2007, 873-876.
- [13] CHAO C C, HUANG S P, HUNG H L. Embedded System on NTP [C]. ICCIT09. Fourth International Conference on Computer Sciences and Convergence Information Technology, IEEE, 2009: 852-857.
- [14] MACHIZAWA A, IWAMA T. Exponential degrading of NTP synchronization with number of network hops [C]. European Frequency and Time Forum & International Frequency Control Symposium (EFTF/IFC), 2013, 97-100.
- [15] CHEN M, WEI G. OPNET IEEE 802.11 WLAN modeling and performance testing [J]. Computer Engineering, 2004, 30(21): 14-16.

### 作者简介

魏振春, 1978 年出生, 合肥工业大学计算机与信息学院副教授, 硕士生导师。主要研究方向为物联网、无线传感器网络和分布式控制与嵌入式系统。

E-mail: wzc@ialab.hfut.edu.cn

**Wei Zhenchun** was born in 1978, and now he is associate professor in School of Computer and Information, Hefei University of Technology. His main research interest is internet of things, wireless sensor network, DCS and embedded system.

郭令, 1989 年出生, 合肥工业大学计算机与信息学院硕士研究生。研究方向为物联网。

E-mail: 916512442@qq.com

**Guo Ling** was born in 1989, and now he is M. Sc. candidate in School of Computer and Information, Hefei University of Technology. The research direction is the internet of things.

石雷, 1980 年出生, 合肥工业大学计算机与信息学院讲师, 硕士生导师。主要研究方向为无线传感器网络。

E-mail: shilei@hfut.edu.cn

**Shi Lei** was born in 1980, and now he is lecturer in School of Computer and Information, Hefei University of Technology. His main research interest is wireless sensor network.