

## 应急通信系统中快速二层切换协议的设计与实现

李方敏<sup>1,2</sup>, 曾乐<sup>2</sup>, 沈逸<sup>2</sup>, 张韬<sup>1</sup>

(1. 长沙学院计算机工程与应用数学学院, 湖南 长沙 410022; 2. 武汉理工大学信息工程学院, 湖北 武汉 430070)

**摘 要:** 传统的应急通信系统存在机动性差、网络带宽窄、对实时型业务支持较差等问题; 更为严重的是, 当移动终端在应急通信系统的多个骨干节点间移动时, 其较大的切换时延和固定的触发切换判决门限严重限制了高速传输的数据业务。针对这一现状, 设计了适用于快速切换环境的采用多频分层分簇网络结构的应急通信系统, 并提出一种适用于该网络结构的快速二层切换协议, 以满足应急通信系统中终端的实时型业务数据传输对越区切换的严格要求, 根据终端的移动速率自适应调整触发切换判决门限。

**关键词:** 应急通信; 快速二层切换; 速率自适应

**中图分类号:** TP393

**文献标识码:** A

## Design and implementation of a layer-II fast handoff protocol in emergency communication system

LI Fang-min<sup>1,2</sup>, ZENG Le<sup>2</sup>, SHEN Yi<sup>2</sup>, ZHANG Tao<sup>1</sup>

(1. School of Computer Engineering and Applied Mathematic, Changsha University, Changsha 410022, China;

2. School of Information Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** Immobility, limited bandwidth and poor support to real-time service are common shortcomings in traditional emergency communication system. Moreover, the data transmission speed is highly limited in high-speed services by the long handoff delay and fixed handoff trigger threshold when the mobile terminals moving between network nodes. In order to overcome these shortcomings, a new emergency communication system with multifrequency hierarchical clustering structure was designed. A new layer-II fast handoff protocol was designed for such network structure to deal with handoff issue in real-time services. In this handoff protocol, the handoff trigger threshold is self-adaption based on the moving velocity of mobile terminals.

**Key words:** emergency communication, layer-II fast handoff, rate adaptation

### 1 引言

由于自然灾害和紧急突发事件对应急通信的刚性需求以及战场指挥和战场数据的实时传输对应急通信的高度依赖, 欧洲及美国等国家和地区从制定标准着手, ITU-T、ETSI、IETF 等工作组提出了应用于不同场景下的应急通信系统<sup>[1]</sup>, 一种应急值守和突发事件处置不可或缺的工具手段, 是应急平台的核心系统。在灾区提供网络服务被认为是至

关重要的, 因为它将通过信息来协助救援工作 (救援人员、避难所的位置等) 以及确保灾区内人群的通信需求<sup>[2]</sup>。然而, 地方的基础设施在紧急情况下通常会被销毁或无法正常工作。因此, 应急通信通常不能依靠当地的固定通信设备。紧急情况发生时人群集中在某些地区, 这将导致通信需求在短时间内快速增加。因此应急通信系统不应该依赖于当地的固定设备, 而应该可以快速构建<sup>[3]</sup>。我国的应急通信装备和技术在经历了几次抢险救灾和应对突

收稿日期: 2017-09-26

通信作者: 张韬, 87718823@qq.com

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61373042); 长沙市科技计划基金资助项目 (No.ZD6101004)

**Foundation Items:** The National Natural Science Foundation of China (No.61373042), Changsha Science and Technology Project (No.ZD6101004)

发事件的锻炼中，得到了较大的进步，但是应急通信的关键技术。例如，应急机动指挥通信和应急管理领域的研究还相对滞后，缺乏可以使各个专网或异构网络之间实现有效互联的统一指挥调度平台<sup>[4]</sup>。

无线局域网中的主机接入网络时一般由扫描、认证及关联 3 个步骤组成；当网络中的主机在一个具有不同接入点的无线中直接移动而发生漫游时，将触发无线网卡执行越区切换操作，其过程由扫描、认证以及重关联组成。但是，IEEE 802.11 工作组并未对上述各个步骤的具体实现以协议的方式来规定，因此各个无线网卡厂商就根据各自的需求进行驱动设计，这也导致了不同生产商的无线网卡在对越区切换功能上的支持各有优劣。正是由于 IEEE 802.11 没有对越区切换过程的详细规范，来自世界各地的研究小组针对此问题做了较为深入的工作。

Mishra 等<sup>[5]</sup>最早提出将传统的 IEEE 802.11 二层切换机制分解成 discovery 和 reauthentication 这 2 个阶段，把二层切换时延划分为探测时延、认证时延和重关联时延，并指出探测时延占整个二层切换时延的 90% 左右。Kishore 等<sup>[6]</sup>提出了不同于传统“break-before-make”越区切换机制的“make-before-break”这种新的切换机制，该机制通过一块网卡完成探测扫描、一块网卡完成数据传输来实现在 MAC 层断开连接之前完成二层切换，但由于该机制要求移动终端具备两块无线网卡，在实际应用中推广困难。

在一些时间敏感型的应用场景中，为了能够在不发生分组丢失率及断连的情况下实现快速二层切换，Montavont 等<sup>[7]</sup>提出了使用地理位置信息辅助实现切换的算法，由 GPS 服务器跟踪记录移动终端的运动轨迹，预测终端将要进行切换时触发其执行切换初始化，并指导终端关联由 GPS 服务器指定的无线接入节点，以此最小化越区切换时延。由于添加了功耗可达 100 mW 的 GPS 接收模块，实时的位置数据更新带来的功耗不可小觑；其次，GPS 定位精度有限，而无线接入节点的重叠覆盖区域范围更为有限，因此可能出现 GPS 服务器触发移动终端发生切换时终端还未到达或已经离开交越区域，导致断连，增大了切换时延。

文献[8]中提出了一种具有移动速度控制改变触发切换条件的算法，该算法需要不断获取终端的移动方向与接入点的角度信息，根据速率和角度信息计算该速率下的最小信号强度值并以此作为触

发判决条件。由于实际场景中获取角度信息较为困难且精确度低，而且该文献中并未阐述具体的实施方案，因此该方案在推广上存在一定的局限性。Wang 等<sup>[9]</sup>提到了多种自适应的垂直切换算法，包括基于速度感知和动态 RSS 阈值切换等，这些算法摒弃了移动终端的速度和坐标信息，使用历史测量接收信号强度数据表征速度变化并以此预测下一刻的接收信号强度信息，进而提高了对切换触发时机判断的准确率。潘甦等<sup>[10]</sup>提出的一种优化算法考虑了终端移动趋势，利用趋势量化参数来推断终端最终的目标区域，解决已有判决算法中存在的非必要切换过多的问题，提高切换成功率。但是，这 2 种算法主要应用于异构网络中的垂直切换，且算法停留在仿真阶段，作者并没有给出具体的实施方案。针对终端的移动速度在越区切换中的影响，Wang 等<sup>[11]</sup>利用加速度预测下一采样时刻的速度，结合经典的基于驻留时间和迟滞电平算法，提出了一种有效解决乒乓效应和切换时延的异构网络切换算法，有效减少切换频次并降低切换时延。郭稳涛<sup>[12]</sup>提出一种基于上下文感知的垂直切换判决策略，可以有效改善异构网络环境中的切换时延和吞吐量等问题。马彬等<sup>[13]</sup>提出在需要垂直切换时，利用马尔可夫过程的转移概率预测未来网络状态的变化，并采用模糊逻辑方法确定评价属性参数权重，最后比较切换决策、切换执行和切换之后时刻的总收益来优化选择最佳切换网络。仿真结果证明，该算法在确保较高负载均衡的情况下，可有效改进终端的平均阻塞率及分组丢失率，降低乒乓效应，确保了终端的 QoS。

## 2 快速切换机制

本文的主要研究内容为适用于应急通信系统的快速二层切换协议，主要分为 3 个部分，1) 采用合理的分布式信道分配策略，对有限的资源进行合理的分配，同时减少同频和邻频的干扰以保证网络服务质量；2) 提出触发切换带的概念，有效地避开终端移动速度方向这一矢量问题，并在此基础上根据 RSSI 提出了具有移动终端速率自适应的触发扫描机制；3) 在定向信道扫描方式的驱动下，大幅度减少越区切换扫描阶段时延并解决执行切换操作时分组丢失的问题。研究框架如图 1 所示。

本文研究的应急通信系统中的移动终端接入网络以及发生越区切换时的操作过程采用了 MCHO<sup>[14]</sup>

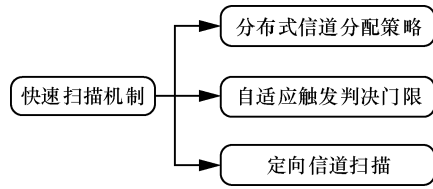


图 1 研究框架

方式，这种方式存在切换时延过大的问题。更为严重的是，在触发切换判决门限相对固定的前提下，应急通信系统中移动终端的移动速度的离散将导致终端移速较低时在切换带内来回切换发生乒乓效应，而移速较高时因为触发较晚，当还未完成越区切换时就已经离开了当前接入点的覆盖范围，进而出现断连现象。

图 2(a)定义了由 2 个无线接入点组成的越区切换模型。 $r=R_{th}$  是无线接入点的覆盖半径，阴影部分是两个无线接入点  $O_1$  和  $O_2$  的交叠部分，定义此交叠区域为切换带。由两圆交点连接的直线将切换带分隔成两部分，分别为切换带 I 和切换带 II，处于切换带 I 中的终端收到的  $O_1$  信号强度要强于  $O_2$  的信号强度，同理有处于切换带 II 中的终端收到的  $O_2$  信号强度要强于  $O_1$  的信号强度。

图 2(b)中， $RSSI_2$  曲线表示  $O_1$  接入点的接收信号强度变化规律， $RSSI_1$  曲线表示  $O_2$  接入点的接收信号强度变化规律，两条曲线的交点即是两个接入点的中心，位于切换带中心。

定义  $RSSI_{trigger}$  为触发扫描时的接收信号强度， $RSSI_{range}$  为无线接入点即应急通信网络中的簇头节点的有效覆盖范围对应的接收信号强度， $d_{trigger}$  为触发扫描时移动终端到簇头节点的距离

离， $d_{range}$  为簇头节点的有效覆盖范围，即当移动终端到簇头节点的距离超过  $d_{range}$  时，由于此时的信号强度不足以提供可靠的数据通信因而出现断开连接的现象。因此  $\Delta d$  即可表示终端在网络中的切换带

$$\Delta d = d_{range} - d_{trigger} \quad (1)$$

当移动终端检测到其接收信号强度到达  $RSSI_{trigger}$  时，触发移动终端执行越区切换的扫描过程，并在扫描到邻居接入点后选择最佳的节点进行认证以及重关联，设移动终端以速度  $v$  匀速直线运动，移动终端从开始触发扫描到重关联成功的时长为  $\Delta t$ ，结合式(1)有

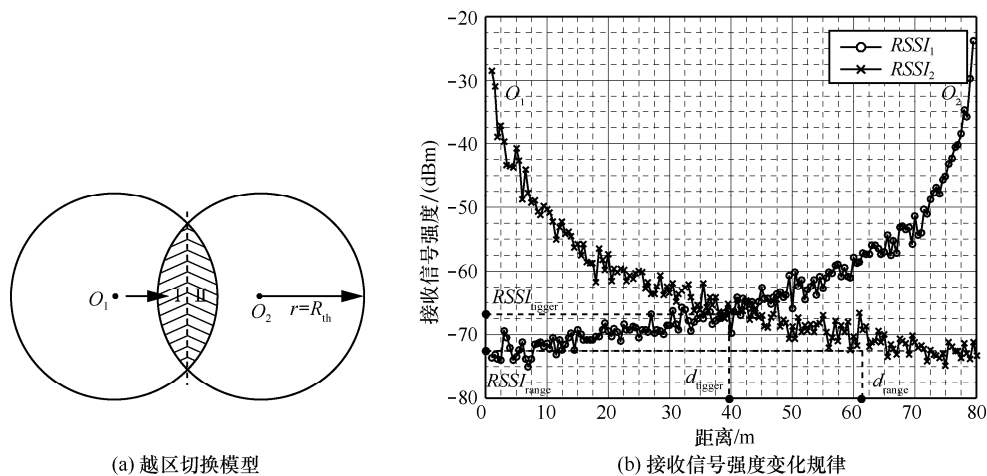
$$\Delta d \geq v\Delta t \quad (2)$$

即需要在距离切换临界点大于  $\Delta d$  时开始切换，才能满足在离开当前接入点的覆盖范围前完成越区切换。于是本文提出的应急通信网络快速二层切换基于式(1)和式(2)就有以下 3 个结论。

- (1) 当利用合理扫描机制减少整个切换过程的时延  $\Delta t$  时，可以在一定程度上容忍具有更大移动速率  $v$  的终端完成切换。
- (2) 调整触发切换扫描的  $RSSI_{trigger}$ ，将  $d_{trigger}$  提前，因此存在更大的  $\Delta d$ ，由此实现更大的移动速率  $v$  容忍上限。
- (3) 根据移动终端的移动速率  $v$  对触发扫描的  $RSSI_{trigger}$  进行自适应调整，避免出现乒乓效应。

### 2.1 分布式信道分配策略

无线通信网络的实际使用带宽与有线通信网络相比非常有限，ISM 给 2.4 GHz 频段的 IEEE



(a) 越区切换模型

(b) 接收信号强度变化规律

图 2 两个无线接入点组成的越区切换模型及信号强度与距离的关系

802.11 分配有 80 MHz 带宽并被细分为 13 个存在交叠的信道，同时在接入点的覆盖范围内的移动节点将共享同一信道，这就大大增加了移动节点间发生冲突的概率。为给网络中参与竞争访问的移动节点提供公平的信道服务，尽可能地减少同频或邻频干扰以保证网络服务质量，就必须建立一套合理的信道分配策略以充分利用无线频谱，对有限的资源进行合理分配。

分布式信道分配策略流程如图 3(a)所示，簇头节点通过扫描各个信道的无线电能自行感知信道质量，并与邻居簇头节点交互，簇头节点间根据统计的信道质量信息从 (1#、6#、11#)、(2#、7#、12#)、(3#、8#、13#) 3 个备选信道组中选择信道质量最优的一组。当选择好最优信道组后，所有簇头节点进行初始化操作，并根据簇头节点的 MAC 地址和由 GPS 获得的位置信息逐一完成信道分配，最终得到如图 3(b)所示的分配结果。

### 2.2 具有移动速率自适应的触发扫描机制

当终端在无线接入点（簇头节点）的覆盖范围内移动时，只有其沿半径方向的径向速度分量  $v_{\text{径向}}$  才能引起接收信号强度值的改变，速度分量与越区切换的关系如图 4 所示，故需要终端移动方向作为判决指标的切换模型，且需要额外增加 GPS，既增加了系统功耗，也增大了终端的运算复杂度，故本文提出一种结合终端移动速率大小信息的切换触发参考点自适应调整的快速切换机制。该机制是建立在终端在网络中匀速前进，且在完成整个切换的时延相对稳定的前提下，通过使用低功耗的惯性传感器获取终端的移动速率大小，进而调整其在越区切换过程中触发扫描的参考指标  $RSSI$  的大小，结合上文中利用分布式信道分配实现的无缝网络覆

盖，在保证终端在网络中顺利完成越区切换的同时，有效避免了乒乓效应与断连现象的发生。

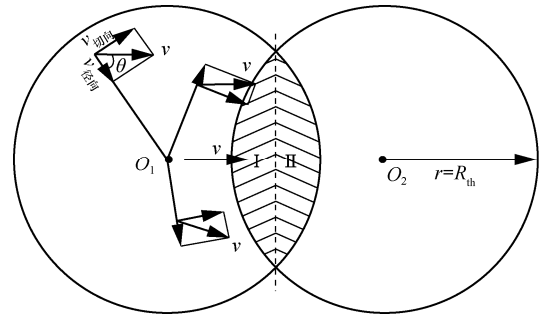


图 4 速度分量与越区切换的关系

应急通信网络中簇头节点的覆盖范围是以图 5 中的  $d_{\text{range}}$  为半径的圆，圆心即是簇头节点。假设当终端沿径向运动时，且移动速率为  $v$ ，定义触发终端进行越区切换的信号强度为  $RSSI_{\text{trigger}}$ 。

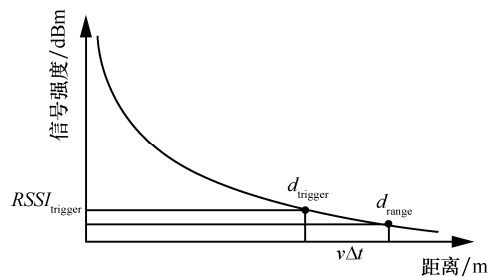


图 5 触发点与移动速率的关系

为保证终端在触发切换操作后能在达到  $d_{\text{range}}$  之前顺利完成切换过程，连接到邻居簇头节点，则必须满足式(3)，同时根据 Friis 公式可以得到式(4)和式(5)。

$$\Delta d = d_{\text{range}} - d_{\text{trigger}} \geq v\Delta t \quad (3)$$

$$RSSI_{\text{range}} \approx M - 10n \lg d_{\text{range}} \quad (4)$$

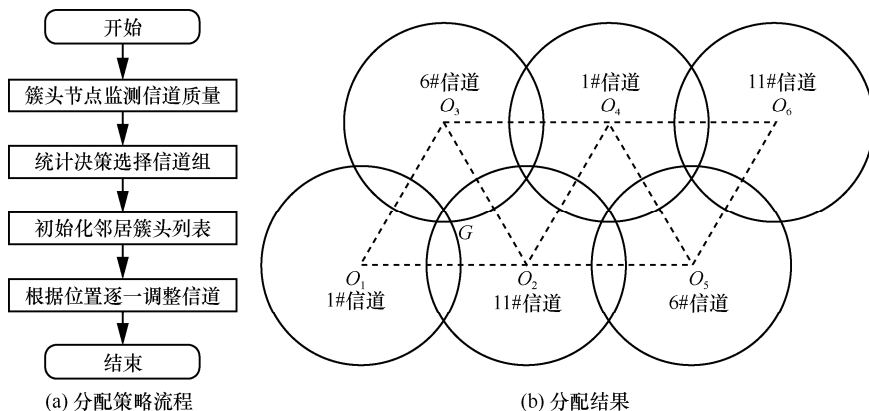


图 3 分布式信道分配策略流程及结果

$$RSSI_{trigger} \approx M - 10n \lg d_{range} \quad (5)$$

结合式(4)和式(5)有

$$RSSI_{trigger} \geq M - 10n \lg(d_{range} - v\Delta t) \quad (6)$$

应急通信网络中， $M$ 、 $n$ 均为固定值， $d_{range}$ 与实际使用的簇头节点发射功率相关，实际使用中也为一固定值， $\Delta t$ 是终端完成一次完整的切换所需要的时间，此处认定 $\Delta t$ 为一固定值。因此，通过式(6)可以得出节点在应急通信网络中的移动速率与其触发扫描的  $RSSI$  值存在一定关联。当切换时延  $\Delta t < 0.1s$  时， $d_{range} - v\Delta t$  随移动速度的改变极小，此时移动速度与触发切换的信号强度呈线性关系；当切换时延  $\Delta t > 0.5s$  时， $d_{range} - v\Delta t$  随移动速度的改变较为明显，移动速度与触发切换的信号强度呈对数关系。

终端在应急通信网络中运动时，通过惯性传感器获取其速度信息，并根据速度信息利用式(6)计算此速度对应的  $RSSI_{trigger}$ ；通过网卡不断监听当前的接收信号强度  $RSSI_{current}$  并与  $RSSI_{trigger}$  比较。当  $RSSI_{current} > RSSI_{trigger}$  时，表明终端已经到达当前速度对应的触发切换带，于是终端触发切换扫描操作，具体流程如图 6 所示。

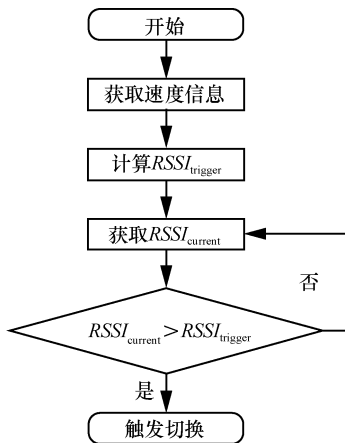


图 6 触发切换扫描流程

利用上文中提及的分布式信道分配技术实现应急通信网络的无缝覆盖，在此前提下，终端沿任何方向运动，一旦按照图 6 所示触发切换操作，则可以在  $\Delta t$  内顺利完成整个切换过程并成功关联到邻居簇头节点继续进行数据传输。

### 2.3 指定信道扫描的快速扫描机制

一旦终端被触发开始进行信道扫描，将按照图 7

所示流程图进行指定信道扫描流程。终端在应急通信网络中伴随有数据传输，当其在执行切换操作时，会接入其他信道上收发数据，因此与当前关联的簇头节点间的数据传输将出现分组丢失现象，为解决这个问题，终端首先向当前关联的簇头节点发送服务挂起 (service suspend) 数据帧，簇头节点收到此帧后，缓存将要发送给终端的数据，待终端关联到新的簇头节点后，再将缓存数据通过簇头间的数据传输机制发送给新的簇头节点并转发给终端，实现数据更新并保证可靠的数据传输，避免切换过程中分组丢失现象的发生。

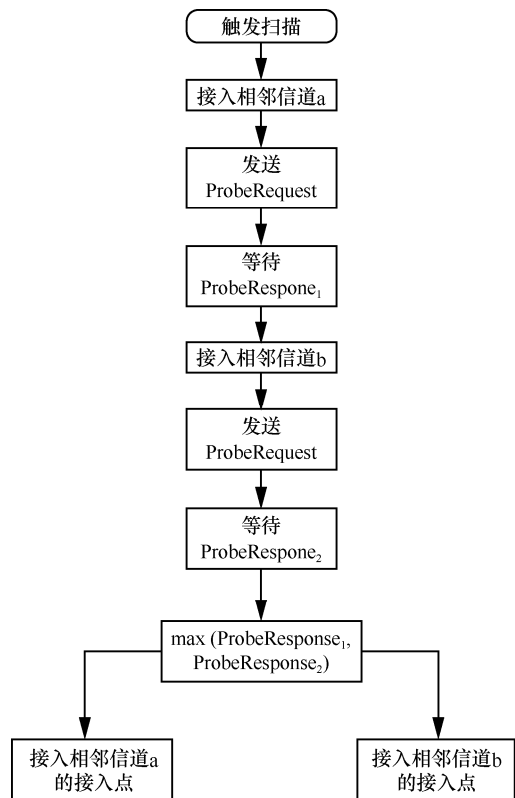


图 7 指定信道扫描机制流程

## 3 测试结果与分析

应急通信系统中快速二层切换实验网络拓扑如图 8 所示，选择室外空旷且直线行走距离超过 80 m 的区域作为实验场地。采用 3 个通过网线与路由器互联的无线 AP 作为本文的簇头节点，实验者手持两台笔记本电脑，其中一台安装了 Intel3945 无线网卡作为移动终端，并移植了具有移动速率自适应的快速切换机制，另一台笔记本安装了 3 张无线网卡，分别检测 3 个 AP 的工作信道，作为监听节点监听整个过程中与切换相关的 MAC 帧，与此同时，移

动终端通过簇头节点与通过有线与路由器连接的固定终端互相收发数据,并使用 iperf 记录分组丢失率和传输速率。

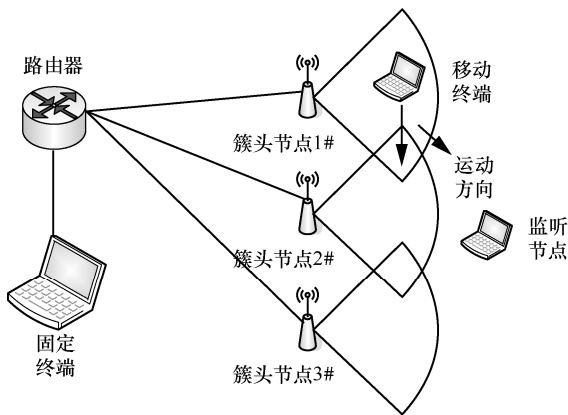


图 8 快速二层切换网络拓扑结构

由于本文介绍的是具有移动速率自适应的触发切换扫描机制,其优化不会影响认证阶段,因此认证阶段就采用了传统的开放系统认证,且不对其时延进行统计。

在来回走动过程中发生的多次越区切换中随机抽取其中 16 次切换,通过 Wireshark 分组抓取的形式获得关键帧的时间戳,从而统计得到的扫描阶段时延如图 9 所示。

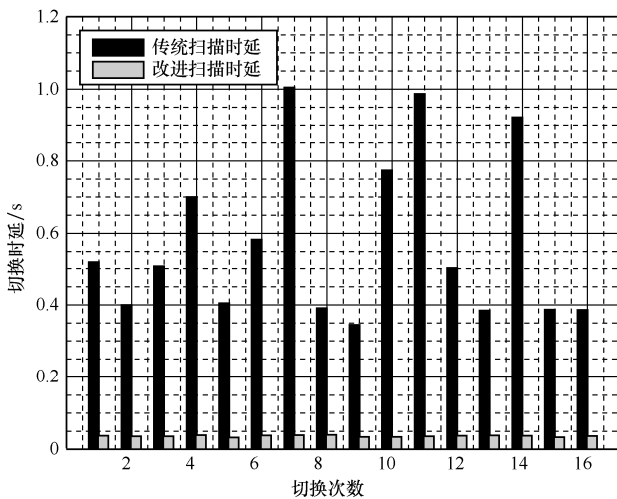


图 9 改进后扫描时延与传统扫描时延对比

首先,根据图 9 可以看出,改进后的扫描方式对比传统的 IEEE 802.11 的扫描方式,在扫描时延上有非常大的改进,其深层原因是本文通过修改 iw13945 网卡驱动,限制了终端的扫描信道数量以及各个信道上的停留时间。此外,对比文献[8,15]中通过采用 Ix Chariot 软件测试网络吞吐率进而计

算切换时延的方式,本文利用 Wireshark 分组抓取统计切换时延的方式,统计更为精确,且多次测量的结果相对于文献[8]中一次测量更具有价值,同时 40 ms 的切换时延相对文献[8]中 200 ms 时延有大幅缩减。文献[16]中利用 NS2 软件仿真(该文献未提供真实实验数据)得到终端以 4 m/s 的速度在多个无线接入点之间移动的切换时延结果,其统计时延在 20~60 ms,主要原因是随着空间接入点数量增加,终端扫描信道数也随之增加,导致时延增大。文献[17]中由于缓存了可用的接入点信息,在切换时可以省去大部分扫描时延,使整体切换时延分布在 10~50 ms,但是该方案与当前传输的业务数据负载正相关,当业务负载较大时,切换时延也明显上升,并不适合本文算法要求。应急通信系统中正方形分布的无缝覆盖拓扑由于选择了互不交叠的 3 个信道,如图 3 所示,保证了终端在切换时能够扫描指定信道,从而限制了时延。

分组丢失率测试采取了对移动终端到固定终端和固定终端到移动终端 2 个方向的测试,即图 10 中 C2S 方向分组丢失率和 S2C 方向分组丢失率。其中从移动终端到固定终端方向,由于移动终端在发生越区切换时根据信号强度的标志位,向簇头节点发送了服务挂起数据帧,因此移动终端在越区切换时会暂停数据发送,故期间分组丢失率为零;而固定终端通过簇头节点发往移动终端的数据,由于簇头节点检测到对应移动终端的服务挂起数据帧需要对数据进行缓存而非转发,于是此时的分组丢失率也为零。从多次分组丢失率测试结果中随机选择一组数据分析,在两次越区切换过程中,2 个方向的分组丢失率都将为零,而非切换时,由于无线信道的不可靠因素导致出现偶尔的分组丢失现象,在目前的可靠数据传输协议下是可以接受的。由于在相同测试环境下分组丢失率会有电磁等干扰,故非切换时分组丢失率会有细微的波动。

几种不同切换方式分组丢失率对比见表 1。对比文献[8,15]中用 ping 测试分组丢失率的方式,本文采用 iperf 软件测试,具备瞬时的分组丢失统计,客观地反映了切换过程的分组丢失现象,较使用 ping 测试的方法更为准确,文献[15]更是实现了从终端到接入点双向数据传输的零分组丢失,这是该文献优于本文算法的地方。文献[16]中对邻居地图切换算法和模糊逻辑切换算法的分组丢失现象进行统计对比,

统计了每秒分组丢失数量，根据计算邻居地图算法的分组丢失率在 6%~20%，而基于模糊逻辑的切换算法分组丢失率在 3%~6%，文献[15,16]中仅给出了最终的平均分组丢失率而未对切换和非切换过程的分组丢失率进行统计，因此表 1 中没有对应数据。根据图 10 中的圆点波形可见，本文提出的算法中，分组丢失率在 10%以下，平均分组丢失率在 1%左右。由于采用了切换期间对数据分组进行缓存的策略，算法不会在切换过程中发生数据分组丢失。

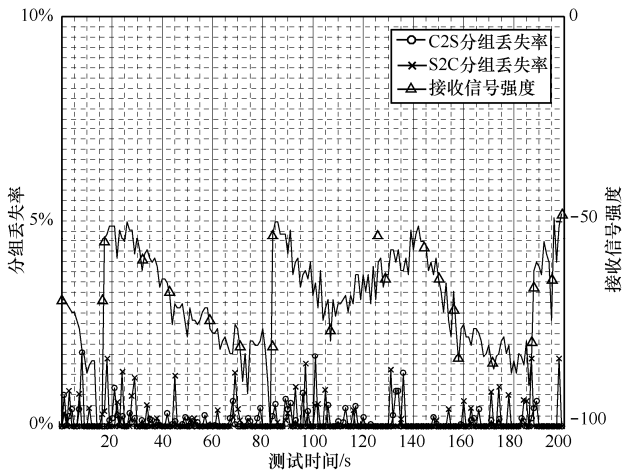


图 10 快速二层切换分组丢失率统计

表 1 几种不同切换方式分组丢失率对比

切换方式	切换时分组丢失率	非切换时分组丢失率	总分组丢失率
传统切换方式	59.38%	0.63%	9.14%
本文切换方式	0	0.75%	0.64%
文献[16]	—	—	6%
文献[15]	—	—	0%

在满足应急通信网络中终端的扫描时延相对固定且分组丢失率较低的前提下，需要验证终端在不同移动速率下的触发切换条件的自适应情况。测试时手持移动终端或将移动终端安置在自行车上，分别测试了不同移动速率下的切换过程中接收信号强度的变化情况，根据其变化状况分析验证移动终端都能切换成功，没有发生断线重连的状况，如图 11 所示。

经过大量测试，从不同移动速率的测试数据中随机选择了部分数据，图 11 中结果验证了 1 m/s、2 m/s、3 m/s、5 m/s 这 4 个不同速率下移动终端可以成功切换。由于从图 9 中得到切换时延不到 40 ms，故从图 11 中结果可以看出，4 次越区切换时，在 iwconfig 以 100 ms 的统计间隔中，捕获到的信

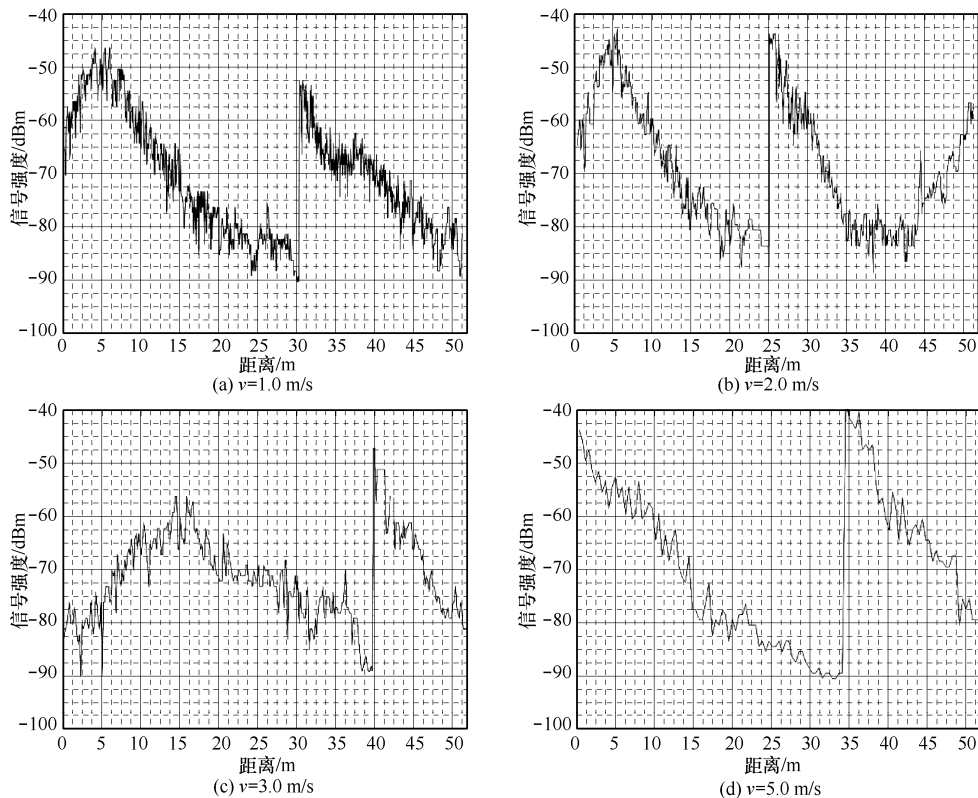


图 11 不同移动速度下终端切换状态

号强度是连续的结果,且未发生分组丢失及断连现象。本文提出的具有移动速率自适应的触发切换算法很好地解决了固定触发切换条件下的分组丢失断连问题。

综上所述,切换时延、双向分组丢失率及自适应触发切换 3 个实验结果表明,本文提出的适用于应急通信系统的快速二层切换协议能够很好地满足通信带宽、网络吞吐量的需求以及应急通信网络中对实时性要求较高的应用需求,并且能良好地支持不同移动速率下的自适应触发切换操作。

#### 4 结束语

应急通信系统作为一种专用通信网络,其应用范围针对性强,针对应急通信系统中的越区切换问题,尤其是网络中终端不同的移动速率带来的差异化的越区切换结果这一现象,本文提出了具有自适应触发判决门限的快速二层切换协议,最终辅以对比实验验证了协议的可行性,为后期改进和完善应急通信系统及有针对性的快速二层切换协议提供一定的理论指导。下一步的工作是考虑在信道干扰等会对本系统稳定性有影响的因素下,对系统进行进一步的优化,提高系统在实际复杂环境中的稳定性。本文的主要工作内容总结如下。

1) 从传统无线局域网的二层切换入手,分析了切换策略中的不同参考标准以及各自存在的问题;阐述了无线通信的信道模型,指出应急通信系统中的信道特点与待解决问题。综合无线信道模型、接收信号强度和传输速率与距离的关系,提出了适用于应急通信系统的切换模型。

2) 创新性地提出具有移动终端速率自适应的触发扫描机制,结合合理的分布式信道分配机制,在定向信道扫描方式的驱动下,大幅度减少越区切换扫描阶段时延。

3) 搭建了实验平台,在 Ubuntu 下改写 Intel3945 网卡驱动,重点实现本文所述具有移动速率自适应的快速二层切换协议,并在实际环境中对基于该协议的切换时延以及分组丢失率等参数进行统计评估,对比基于传统 IEEE 802.11 协议和其他改进协议的切换时延和分组丢失率发现本文提出的协议具有良好的移动速率自适应能力,并且大大降低了切换时延,对于应急通信系统中实时型业务数据的传输有良好的支持。

#### 参考文献:

- [1] 王巍, 赵文红. 应急通信网拓扑模型及其分析[J]. 通信学报, 2012(S1): 201-209.  
WANG W, ZHAO W H. Topology modeling and analysis of emergency communication network[J]. Journal on Communications, 2012(S1): 201-209.
- [2] TOMMASO P, LUCA SIMONE R, FRANCESCO C, et al. Emergency satellite communications: research and standardization activities[J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(5): 170-177.
- [3] FAN D D, LI B J, FEI L G, et al. Design of global emergency communication system based on geosynchronous TDRSS[C]//Wireless Communications & Signal Processing (WCSP), 2015: 1-4.
- [4] 范楷. 新一代应急指挥调度通信系统研究[J]. 通信技术, 2011, 44(3): 35-37.  
FAN K. Study on new-generation emergency command and dispatch communication system[J]. Communications Technology, 2011, 44(3): 35-37.
- [5] MISHRA A, SHIN M, ARBAUGH W. An empirical analysis of the IEEE 802.11 MAC layer handoff process[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2003, 33(2): 93-102.
- [6] RAMACHANDRAN K, RANGARAJAN S, LIN J C. Make-before-break MAC layer handoff in 802.11 wireless networks[C]// IEEE International Conference on Communications, 2006. ICC'06, 2006: 4818-4823.
- [7] ALMULLA M, WANG Y, BOUKERCHE A, et al. A fast location-based handoff scheme for vehicular networks[C]//2013 IEEE International Conference on Communications (ICC), 2013: 1464-1468.
- [8] 钱红燕. 高速移动子网的切换与漫游关键技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.  
QIAN H Y. Research on handoff and roaming scheme for mobile subnet with high speed[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010.
- [9] WANG Y W, LIU M, FANG B Y. Survey on vertical handoff in heterogeneous wireless networks[J]. Journal on Communications, 2015, 36(Z1): 224-234.
- [10] 潘甦, 梁宇, 刘胜美. 一种基于移动趋势量化的多属性垂直切换判决算法[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(2): 269-275.  
PAN S, LIANG Y, LIU S M. A multi-attribute vertical handoff decision algorithm based on motion trend quantification[J]. JEIT, 2016, 38(2): 269-275.
- [11] WANG L H, ZHENG H, CHEN Y J, et al. Vertical handover algorithm based on acceleration prediction within heterogeneous network[J]. Computer Systems & Applications, 2016, 25(6): 160-165.
- [12] 郭稳涛. 基于异构网络上下文感知垂直切换判决策略的研究[J]. 移动通信, 2016, 40(12): 55-58.  
GUO W T. Research on context aware vertical handoff decision in heterogeneous networks[J]. Mobile Communications, 2016, 40(12): 55-58.
- [13] 马彬, 谢显中, 廖晓峰. 车辆异构网络中预测垂直切换算法[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(4): 874-880.  
MA B, XIE X Z, LIAO X F. Prediction vertical handoff algorithm in vehicle heterogeneous network[J]. Journal of Electronics & Informa-

tion Technology, 2015, 37(4): 874-880.

- [14] CHAUHAN V, GUPTA J, SINGLA C. Proposed mobile controlled handoff (MCHO) in 3GPP long term evolution (LTE) system[M]// Contemporary Computing. Springer Berlin Heidelberg, 2012: 294-305.
- [15] QIAN H Y, CHEN B, QIN X L. A novel mobility management protocol supporting network seamless roaming[J]. Journal of Networks, 2010, 5(3): 367-374.
- [16] 钟小东. 无线局域网 MAC 层切换算法的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.  
ZHONG X D. Research of MAC layer handoff in wireless LANs[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012.
- [17] YIN H X, NI H B, SUN L, et al. A caching-list based fast handoff mechanism in wireless mesh networks[C]// IEEE ICT Convergence (ICTC), 2013: 402-407.

作者简介:



李方敏 (1968-), 男, 湖南涟源人, 博士, 长沙学院教授、博士生导师, 主要研究方向为无线网络通信与智能感知、机器学习与大数据处理。



曾乐 (1991-), 男, 四川泸州人, 武汉理工大学硕士生, 主要研究方向为无线网络通信。



沈逸 (1993-), 男, 浙江湖州人, 武汉理工大学硕士生, 主要研究方向为无线网络通信。



张韬 (1979-), 男, 湖北襄阳人, 博士, 长沙学院讲师, 主要研究方向为无线网络通信与智能感知、机器学习与大数据处理。