

# 移动互联网:终端、网络与服务

罗军舟 吴文甲 杨 明

(东南大学计算机科学与工程学院 南京 211189)

**摘 要** 随着宽带无线接入技术和移动终端技术的飞速发展,人们迫切希望能够随时随地乃至在移动过程中都能方便地从互联网获取信息和服务,移动互联网应运而生并迅猛发展.然而,移动互联网在移动终端、接入网络、应用服务、安全与隐私保护等方面还面临着一系列的挑战.其基础理论与关键技术的研究,对于国家信息产业整体发展具有重要的现实意义.文中从移动终端、接入网络、应用服务及安全与隐私保护 4 个方面对移动互联网的研究进展进行阐述与分析,并介绍了作者在 WLAN 基站原型系统及无线 Mesh 网络性能优化方面的研究工作.最后对未来的研究方向进行展望.

**关键词** 移动互联网;移动终端;接入网络;应用服务;安全与隐私保护

中图法分类号 TP393

DOI 号: 10.3724/SP.J.1016.2011.02029

## Mobile Internet: Terminal Devices, Networks and Services

LUO Jun-Zhou WU Wen-Jia YANG Ming

(School of Computer Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 211189)

**Abstract** The technologies for wireless broadband access and mobile devices have been changing very fast. People expect that information and services can be delivered from the Internet anytime and anywhere even while they are moving. Under the current circumstances, the Mobile Internet becomes an emerging technology and expects to grow up in an accelerated pace. The challenges we are facing from the Mobile Internet come from the mobile devices, access networks, services and security and privacy protection. It is essential for us to further explore the fundamental theories and key technologies to meet the requirements from our national information industry and broad research communities. We conduct a survey of the Mobile Internet on four aspects, namely mobile devices, access networks, services and security and privacy protection. We further give our research on test-bed of WLAN base station and performance optimization of wireless mesh networks. Finally we conclude the paper by elaborating the future research directions on the Mobile Internet.

**Keywords** Mobile Internet; mobile devices; access networks; services; security and privacy protection

## 1 引 言

移动互联网是当前信息技术领域的热门话题之

一,它体现了“无处不在的网络、无所不能的业务”的思想,正在改变着人们的生活方式和工作方式.移动互联网使得人们可以通过随身携带的移动终端(智能手机、PDA、平板电脑等)随时随地乃至在移动过

收稿日期:2011-08-31;最终修改稿收到日期:2011-10-16. 本课题得到国家“九七三”重点基础研究发展规划项目基金(2010CB328104)、国家自然科学基金(60903161,60903162,61003257,61070161,61070158)、高校博士点专项基金(200802860031)、江苏省自然科学基金重点项目(BK2008030)、江苏省网络与信息安全重点实验室(BM2003201)和计算机网络和信息集成教育部重点实验室(93K-9)资助. 罗军舟,男,1960年生,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为下一代网络体系结构、协议工程、网络安全、网络与云计算、无线局域网. 吴文甲(通信作者),男,1983年生,博士研究生,主要研究方向为无线网络. E-mail: wjwu@seu.edu.cn. 杨 明,男,1979年生,博士,讲师,主要研究方向为网络安全、无线网络.

程中获取互联网服务. 随着宽带无线接入技术和移动终端技术的迅速发展, 全球已经进入移动互联网周期的早期阶段(计算技术先后经历的 5 个发展周期:大型机、小型机、个人电脑、桌面互联网、移动互联网)<sup>[1]</sup>. 目前, 全球 5 亿 Facebook 用户中有 2 亿为移动用户, Twitter 用户中有一半为移动用户, 40% 的微博消息来自移动终端<sup>[2]</sup>. 在国内, 截至 2010 年 12 月, 手机上网用户达 3.03 亿, 较 2009 年底增加了 6930 万人. 同时, 手机上网用户在互联网用户中的比例也进一步提高, 从 2009 年末的 60.8% 提升至 66.2%<sup>[3]</sup>.

移动互联网已成为学术界和业界共同关注的热点, 但对其的定义还没有达成共识. 比较有代表性的定义由中国工业和信息化部电信研究院在 2011 年的《移动互联网白皮书》<sup>[4]</sup>中给出:“移动互联网是以移动网络作为接入网络的互联网及服务, 包括 3 个要素:移动终端、移动网络和应用服务.”上述定义给出了移动互联网两方面的含义:一方面, 移动互联网是移动通信网络与互联网的融合, 用户以移动终端接入无线移动通信网络(2G 网络、3G 网络、WLAN、WiMax 等)的方式访问互联网;另一方面, 移动互联网还产生了大量新型的应用, 这些应用与终端的可移动、可定位和随身携带等特性相结合, 为用户提供个性化的、位置相关的服务.

1991 年 Weiser 在文献[5]中提出了“泛在计算”(Ubiquitous Computing), 即人们可以在任意时

间、任意地点通过合适的终端与网络进行连接从而获取信息与服务, 开启了对移动互联网进行研究的先河. 此后, 移动互联网日渐成为信息技术领域的研究热点, 著名的国际学术会议(MobiCom、MobiSys、INFOCOM、PerCom、WWW、SIGCHI 等)及期刊(IEEE/ACM TON、COMMUN ACM、IEEE TMC 等)上陆续发表了大量移动互联网相关的研究成果.

移动互联网是一个多学科交叉、涵盖范围广泛的研究领域, 涉及互联网、移动通信、无线网络、嵌入式系统等技术. 通过对当前移动互联网研究的相关工作进行归类和梳理, 形成如图 1 所示的移动互联网研究体系. 这个体系有 3 个层面, 分别为移动终端、接入网络和应用服务, 其中, 移动终端和接入网络是应用服务的基础设施. 在该体系中, 移动互联网研究主要包括移动终端、接入网络、应用服务以及安全与隐私保护 4 个方面. 移动终端研究包括终端硬件、操作系统、软件平台、应用软件、节能、定位、上下文感知、内容适配和人机交互等. 接入网络研究包括无线通信基础理论与技术、蜂窝网络、无线局域网、多跳无线网络、异构无线网络融合、移动性管理与无线资源管理等. 应用服务研究包括移动搜索、移动社交网络、移动互联网应用拓展、基于云计算的服务、基于智能手机感知的应用等. 安全与隐私保护研究则涉及移动终端、接入网络、应用服务 3 个层面, 包括内容安全、应用安全、无线网络安全、移动终端安全、位置隐私保护等.

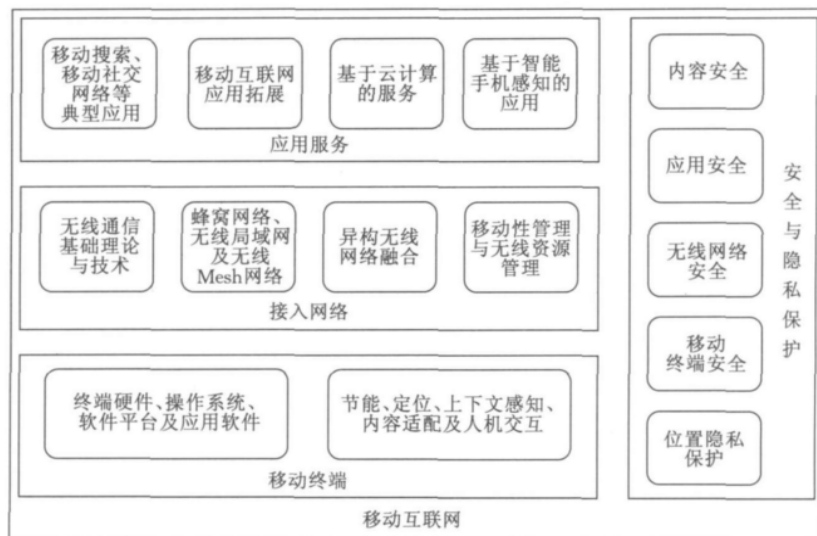


图 1 移动互联网研究体系示意图

根据上述研究体系, 本文分别从移动终端、接入网络、应用服务以及安全与隐私保护 4 个方面对移动互联网的研究进展进行分析与讨论. 第 2 节主要

介绍移动终端节能和定位的研究现状; 第 3 节着重对异构无线网络融合、移动性管理、无线局域网和无线 Mesh 网络的研究工作进行总结; 第 4 节重点介

绍移动搜索和移动社交网络的相关研究工作;第5节则主要讨论移动终端安全和位置隐私保护;第6节介绍我们在 WLAN 基站原型系统及无线 Mesh 网络性能优化方面的研究成果;最后对全文进行总结,提出进一步的研究方向。

## 2 移动终端

移动终端是移动互联网的前提和基础。随着移动终端技术的不断发展,移动终端逐渐具备了较强的计算、存储和处理能力以及触摸屏、定位、视频摄像头等功能组件,拥有了智能操作系统和开放的平台。当前主要的智能终端操作系统有 Google 的 Android、微软的 Windows Mobile、Nokia 的 Symbian、Apple 的 iOS 和 RIM 的 Blackberry OS 等。采用智能终端操作系统的手机,除了具备通话和短信功能外,还具有网络扫描、接口选择、蓝牙 I/O、后台处理、能量监控、节能控制、低层次内存管理、持久存储和位置感知等功能。这些功能使得智能手机在医疗卫生、社交网络、环境监控、交通管理等领域得到越来越多的应用。

移动终端研究不仅涵盖终端硬件、操作系统、软件平台及应用软件<sup>[6-9]</sup>,还包括节能、定位、上下文感知、内容适配和人机交互等技术<sup>[10-15]</sup>。其中,节能和定位至关重要,提高能量利用效率可以增强移动终端的续航能力,获取终端位置则是使用基于位置服务的前提。本文将重点介绍移动终端节能和定位的研究进展。

### 2.1 节能技术

移动终端依赖电池工作,出于便携性的考虑,移动终端的尺寸和重量受到严格限制,制约了电池体积和容量的扩充。随着移动终端软硬件功能的增强,不断增长的能耗需求和有限的电池容量之间的矛盾也日益加剧,制约着移动互联网的广泛应用。因此,如何提高移动终端的能量利用效率成为移动互联网领域一个备受关注的研究方向。

在硬件方面,芯片、显示屏等元器件的低功耗设计、元器件的合理布局等都是降低能耗的有效手段。在软件方面,主要的研究工作有智能电池<sup>[16]</sup>、图形用户界面的节能设计<sup>[17]</sup>、基于休眠的节能方法<sup>[18]</sup>、针对 TCP 协议的节能优化<sup>[19]</sup>、系统级电源管理<sup>[20-21]</sup>和无线通信节能机制<sup>[22-29]</sup>。下面将具体阐述系统级电源管理和无线通信节能机制的相关研究工作。

#### (1) 系统级电源管理

系统平台可通过动态的电源管理来提高电池能量利用效率<sup>[20]</sup>。根据系统各组件的负载,动态地调整其工作状态(开启,关闭,低性能运行),也就是将无任务正在执行的系统组件关闭或使其低性能运行,并在任务达到时将其开启运行,以最少数量的运行组件实时地满足动态的用户功能和性能需求,从而减少不必要的能量消耗。系统级电源管理的通用机制如图2所示,组件观测模块搜集系统中各个运行组件的负载信息,并将其传递给电源决策模块;电源决策模块根据这些负载信息,做出电源管理决策,并将状态迁移的命令下发给各个运行组件。现有的工作大多数都孤立地对系统各组件进行观测并做出相应的电源决策,没有考虑它们之间的交互。Min 等人<sup>[21]</sup>提出了一种系统级集成电源管理方法,考虑了系统主要组件(CPU、无线接口、显示屏等)间的交互,极大地降低了系统能耗。

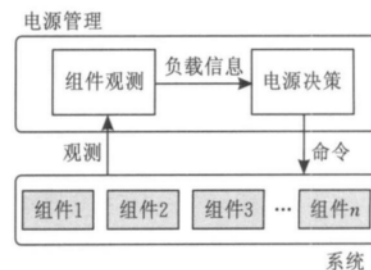


图2 系统级电源管理的通用机制

#### (2) 无线通信节能机制

无线接口是移动终端中主要的能量消耗组件之一,在其进行数据传输时,能量消耗最为显著<sup>[22]</sup>。现有的无线通信节能机制主要有以下3种:多种无线技术混合机制、802.11 MAC 层协议优化以及基于接入点 AP(Access Point)下载调度的能耗优化。

##### ① 多种无线技术混合机制

现有的多种无线技术(WLAN、GSM、蓝牙等)在进行数据传输时,其能耗存在差异。能耗检测结果表明,WLAN 接口相比于其它无线接口(GSM、蓝牙等),在进行数据传输时消耗的能量最多<sup>[23]</sup>。鉴于不同接口之间的能耗差异,Raghuathan 等人<sup>[24]</sup>利用 WLAN 高速率、高能耗的特点以及蓝牙低能耗、低速率的特点,提出了一种 WLAN 接口和蓝牙接口混用机制,在设备发现和连接建立时使用蓝牙接口,而在数据传输时使用 WLAN 接口,从而有效地降低无线通信的能耗。

##### ② 802.11 MAC 层协议优化

在 20 世纪 90 年代后期,IEEE 802.11 标准已

经为 WLAN 设备定义了节能模式 (Power Saving Mode, PSM). 该模式实现在 MAC 层, 有 3 种工作状态: Off、Sleep 和 Awake. 在 Off 状态, 无线接口被关闭, 不能进行任何操作; 在 Sleep 状态, 无线接口不能监听信道和传输数据, 但还需消耗少量的能量; Awake 状态还可以进一步分为 3 种模式: 传输、接收和空闲. 这 3 种模式下能量的消耗不同, 但都明显高于 Sleep 状态<sup>[25]</sup>. PSM 已经在 WLAN 设备上被广泛使用, 但需要在网络性能和能耗进行权衡, 处于 Sleep 状态时间过长, 传输延迟较大; 处于 Sleep 状态过短, 需要消耗较多的能量. 为了解决这个问题, 文献[26-28]提出了一些改进的方法. Krashinsky 等人<sup>[26]</sup>提出了 BSD(Bounded Slowdown)协议, 终端通过不断降低侦听 AP Beacon 帧的频率来增加处于 Sleep 状态的时间, 可以减少能耗, 但延迟问题没有解决. Qiao 等人<sup>[27]</sup>在 BSD 协议的基础上做了改进, 称为智能 PSM, 动态估计处于 Sleep 状态的时间并以此唤醒终端来侦听 AP 的 Beacon 帧. Anastasi 等人<sup>[28]</sup>提出了一种跨层节能方法, 根据应用行为和网路参数动态调整节能策略. 根据应用层流量特征, 用一个下载间隙和 Think 间隙组成的序列来表示 MAC 层行为; 并使用基于 Agent 和 Timeout 的方法来发现 Think 间隙的开始; 在 Think 间隙开始的时候, 切换到 Off 模式; 当检测到应用层请求时, 切换到标准 PSM 模式.

### ③ 基于 AP 下载调度的能耗优化<sup>[29]</sup>

基于 AP 下载调度的能耗优化是一种针对终端下行流量通信、以 AP 为中心的节能机制. 通过对所有与其连接的终端的下行流量进行集中调度, 使得所有终端的下行流量通信的能耗总和最小, 而不是只考虑某个终端的节能. 所有终端以 GPMM(Generic Power Management Model)模式连接到 AP. 在该模式下, 终端并非一直处于 Awake 状态. AP 的调度以 BP(burst period)为单位, 长度为  $L+1$  个时隙, 包含一个时隙的 TIM(Traffic Indication Map)和  $L$  个时隙的数据报文. 在每个 BP 的开始, 终端被唤醒并接收 TIM, 根据 TIM 来判断是否需要接收数据, 若不需要接收数据, 立即返回到 Sleep 状态; 否则, 终端要保持 Awake 状态直至该 BP 中的最后一个报文被调度. 因此, 该问题是一个优化问题, 以最小化每个 BP 中终端的平均能耗为目标,

$$\text{minimize } \bar{E} = \lim_{P \rightarrow \infty} \frac{1}{P} \sum_{q=1}^P \sum_{j=1}^M E_j^q \quad (1)$$

其中,  $P$  是 BP 的数量,  $M$  是终端的数量,  $E_j^q$  是终端

$j$  在 BP  $q$  时段的能耗. 采用不同的调度策略, 最佳的 BP 长度也不同.

## 2.2 定位技术

位置相关是移动互联网服务的重要特点之一, 因此, 移动终端定位与移动互联网的发展紧密相连, 是一个关键的、不可或缺的研究课题. 定位, 也称为位置感知, 是指借助已知空间中的一组参考点的位置来获得该空间中移动用户的位置的过程<sup>[30]</sup>. 定位技术主要有 3 类<sup>[31]</sup>: 卫星定位技术、网络定位技术、感知定位技术. 卫星定位技术利用太空中的人造卫星对移动终端进行定位, 如 GPS、北斗卫星导航系统、伽利略卫星导航系统等; 网络定位技术利用网络基站(或者接入点)等基础设施对移动终端进行定位, 如 2G 网络、3G 网络、WLAN 等; 感知定位技术在指定空间内部署传感器, 当移动终端进入传感器的感知区域时, 则能判定其位置, 如无线射频识别技术(RFID)、红外、蓝牙等.

在应用不断发展的背景下, 定位系统的运行环境、使用范围、用户体验都有了新的变化, 定位技术面临着新的挑战. 卫星定位的研究开展较早<sup>[32]</sup>, 技术比较成熟, 在室外能有效地定位, 但几乎不能覆盖到人们经常工作和活动的室内. 网络定位和感知定位等适用于室内定位的技术成为当前的研究热点<sup>[33]</sup>. 近年来, 随着 WLAN 作为一种与 3G 网络互补融合的宽带无线接入方式被广泛部署以及支持 WLAN 的移动终端的日益普及, WLAN 室内定位引起了国内外学者的广泛关注. 下面将具体介绍 WLAN 室内定位的研究现状.

根据定位原理的不同, WLAN 定位可以分为以下类: 最近 AP 定位<sup>[34-35]</sup>、几何计算定位<sup>[36-41]</sup>和位置指纹(Location Fingerprint)定位<sup>[42-51]</sup>.

### (1) 最近 AP 定位

在 WLAN 中, 每个 AP 都有一定的信号覆盖范围, 进入该区域的移动终端通过与它的连接实现网络接入. 因此, 移动终端必然在其所连接的 AP 的邻近区域里, 可以用 AP 位置来粗略表示该终端的位置. 目前有多种方法可以获取 AP 上记录的所连接终端的信息, 例如采用 RADIUS(Remote Authentication Dial In User Service)服务器来负责 WLAN 用户的认证<sup>[34]</sup>, 在 WLAN 中实现基于 SNMP(Simple Network Management Protocol)的网络管理<sup>[35]</sup>等等. 最近 AP 定位的优点是简单, 易于实现, 无需在终端安装额外的硬件和软件, 但定位的准确性不高.

### (2) 几何计算定位

几何计算定位则利用几何学的原理来计算待测目标的位置,主要有以下两类方法:距离测量法<sup>[36-40]</sup>和角度测量法<sup>[41]</sup>.

距离测量法通过测量待定位目标与其它多个参考点(位置已知)之间的距离来计算待测物体的位置.距离测量方法有多种,如通过测量无线电信号的到达时间(Time of Arrival, TOA)<sup>[36]</sup>、时间差(Time Difference of Arrival, TDOA)<sup>[37]</sup>、往返时间(Roundtrip Time of Flight, RTOF)<sup>[38]</sup>或到达相位(Phase of Arrival, POA)<sup>[39]</sup>来估计距离、利用无线电信号传播的数学模型把在用户端测得的信号强度(Received Signal Strength, RSS)<sup>[40]</sup>转化为距离等等.

角度测量法,也称为到达角度法(Angle of Arrival, AOA)<sup>[41]</sup>,利用两个参考点(位置已知)发射信号到达用户的角度来计算用户位置.

### (3) 位置指纹定位

位置指纹是指用户所处位置的场景特征.位置指纹定位的原理是:用户利用所处位置观测到的位

置指纹,查询位置指纹的样本数据集,根据特定的匹配规则来估计所处的位置.位置指纹有多种表示,如用户所处位置的 RSS、信噪比、TOA 等.其中, RSS 易于测量,不需要额外的软硬件支持,而受到广泛关注.微软研究的 RADAR 定位系统<sup>[42]</sup>就采用了一个 RSSI(RSS Index)的样本数据集,该数据集包含了实验范围内的多个采样位置上测得的信号强度信息(多个方向上来自不同 AP 的 RSSI).在进行定位时,用户只需测得当前位置的信号强度信息,然后以一定规则查询匹配样本数据即可完成位置估计,不需要转换成到 AP 的距离进行几何计算.

位置指纹定位分为两个阶段<sup>[30]</sup>,即离线采集阶段和实时定位阶段,如图 3 所示.在离线采集阶段,首先在定位环境中确定若干采样点,记录在每个采样点位置的信号强度信息(来自所有 AP 的 RSSI),构建一个关于信号强度信息和采样点位置(可以是物理位置,也可以是逻辑位置)关系的位置指纹库;在实时定位阶段,用户通过实时测量获取信号强度信息,并将其与位置指纹库中的信息进行匹配,从而估计该终端的位置.

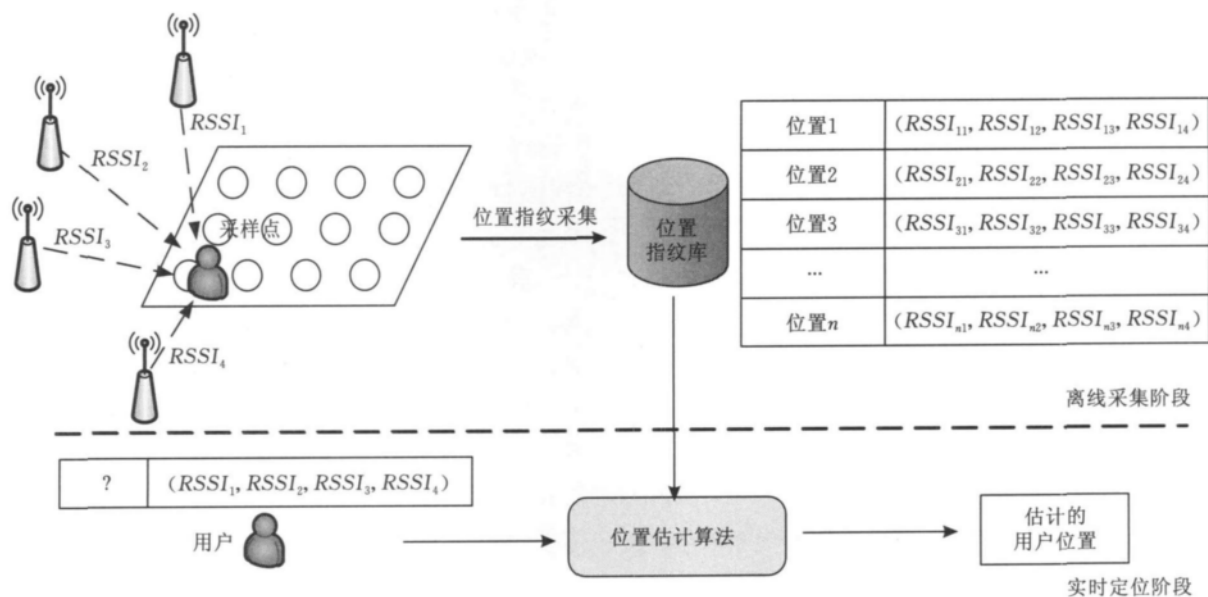


图 3 位置指纹定位

根据位置匹配方法的不同,位置估计算法可以分为以下两类:确定性算法<sup>[42-45]</sup>和基于概率的算法<sup>[46]</sup>.确定性算法主要有  $k$ -最近邻算法( $k$ -Nearest Neighbor,  $k$ NN)<sup>[42]</sup>、神经网络<sup>[43]</sup>、支持向量机(Support Vector Machine, SVM)<sup>[44]</sup>、最小  $M$ -顶点多边形(Small  $M$ -vertex Polygon, SMP)<sup>[45]</sup>等;基于概率的方法利用条件概率为位置指纹建立模型,并通过贝叶斯推理来估计用户的位置<sup>[46]</sup>.

位置估计算法既可以在服务器端执行,也可在移动终端执行.服务器模式需要终端将信号强度信息提交给服务器,并从服务器获得位置估计的结果.这种模式适用于计算能力弱的终端,但存在用户隐私泄露的隐患<sup>[47]</sup>.由于移动终端的计算资源有限,准确性不是定位的唯一目标,同时需要考虑到计算复杂性、能耗和存储空间.一些学者已经开始研究如何在不降低定位准确度的情况下降低系统开销.降

低信号强度信息的维度(AP 的数量)是一个有效手段,Youssef 等人<sup>[48]</sup>利用可用 AP 的子集来降低计算复杂性,其中信号最强的一些 AP 被选择;Chen 等人<sup>[49]</sup>对 AP 进行选择时,以 AP 的位置判别能力作为标准;King 等人<sup>[50]</sup>提出了一种位置指纹信息的选择方法,从而避免拷贝所有的位置指纹信息.另外,由于网络环境的动态变化,会导致位置指纹库中信息过期,从而影响定位的准确度.如何以较小的开销实现位置指纹库的动态更新,目前这方面的研究工作还很少<sup>[51]</sup>.

综上所述,位置指纹定位与其它定位技术相比,虽然定位准确度不及几何计算定位,但其表现出来的优点更具吸引力,该方法不需要知道 AP 的位置、发射功率等信息,不需要终端额外的硬件支持,易于在终端实现.因此,位置指纹定位成为目前 WLAN 室内定位技术的主流.

### 3 接入网络

接入网络是移动互联网的重要基础设施之一.按照网络覆盖范围的不同,现有的无线接入网络主要有五类:卫星通信网络、蜂窝网络(2G 网络、3G 网络等)、无线城域网(WiMax)、无线局域网(WLAN)、基于蓝牙的无线个域网.它们在带宽、覆盖、移动性支持能力和部署成本等方面各有长短.例如,蜂窝网络覆盖范围大,移动性管理技术成熟,但存在着低带宽、高成本等缺陷;WLAN 有着高带宽、低成本的优势,但其覆盖范围有限,移动性管理技术还不成熟.

随着移动互联网的飞速发展,无线接入网络所要支撑的业务已经由以前单一的语音业务转变为综合语音、数据、图像的多媒体业务,现有的无线接入网络已经无法满足其在带宽、覆盖、实时性等多个方面的需求.关于下一代无线通信网络(4G 网络)的设计思路和发展方向,主要有以下 3 种:革新式的发展路线、单系统演进的发展路线和多系统融合演进的发展路线<sup>[52]</sup>.革新式的发展路线,即定义全新的无线接口、通信协议和网络架构,开发成本高且难以推广部署,在时效性和实用性上都有所欠缺;单系统演进的发展路线,即充分利用现有的某种无线接入系统中的基础设施和技术,通过技术增强来实现系统的平滑过渡,是一种低成本的系统升级方案,但系统性能提高有限,不能作为一种长远的发展路线;多系统融合演进的发展路线,即将现有的多种无线接入

技术有效地结合起来,实现异构无线网络融合,这种发展路线既具备了单系统演进路线的低成本、低风险的优点,又能够有效提高系统性能来满足用户需求,是一种实用性和时效性都很强的长期发展路线.

接入网络研究涉及无线通信与网络的基础理论与关键技术,主要包括信息理论与编码、信号处理、宽带无线传输理论、多址技术、多天线 MIMO、认知无线电、短距离无线通信、蜂窝网络、无线局域网、无线 Ad Hoc 网络、无线传感器网络、无线 Mesh 网络、新型网络体系结构、异构无线网络融合、移动性管理、无线资源管理等<sup>[53-60]</sup>.本文将重点介绍异构无线网络融合、移动性管理、无线局域网和无线 Mesh 网络的研究进展.

#### 3.1 异构无线网络融合

关于异构无线网络融合的研究最早可以追溯到 1995 年由美国加州大学伯克利分校发起的 BAR-WAN (Bay Area Wireless Access Network) 计划<sup>[61]</sup>,该计划提出并实现了多模移动终端在无线局域网和无线广域网之间的垂直切换方案.欧洲电信标准协会(ETSI)和第三代合作伙伴计划(3GPP)对 3G 网络与 WLAN 之间的互连互通进行了深入的研究<sup>[62-64]</sup>.欧盟第六框架计划(EUFP6)中的 Ambient Networks<sup>[65]</sup>、DRIVE<sup>[66]</sup>、WINNER<sup>[67]</sup>和 EVEREST<sup>[68]</sup>等计划在异构无线网络的架构和核心功能实现等方面也取得了丰硕的研究成果.

异构无线网络的融合架构包含两个方面的要素:一是各种无线接入系统之间以何种方式互连互通;二是各种功能模块如何进行划分,即各项管理功能(计费、无线资源管理和移动性管理等)在网络实体上的分布以及这些实体在网络架构中的位置<sup>[69]</sup>.按异构网络集成的紧密程度不同,异构无线网络架构可分为紧耦合(tight coupling)和松耦合(loose coupling)两类.

##### (1) 紧耦合网络架构

紧耦合是指参与构成异构无线网络的无线接入系统之间存在主从关系.以 3G 网络与 WLAN 的互连互通为例,3G 网络与 WLAN 之间存在主从关系,WLAN 的 AP 通过专用的接入网关连接到 3G 网络核心网<sup>[70]</sup>.这样,WLAN 只是 3G 网络系统中的一个无线接入网,WLAN 的所有业务都被引入到 3G 网络核心网中,而且 WLAN 和 3G 网络的无线接入网共享 3G 网络系统提供的认证、授权和计费功能和信令协议,多模终端在 3G 网络和 WLAN 之

间的垂直切换也可以由 3G 网络的移动性管理功能来实现. 虽然这种架构在网间切换时延、失败率和丢包率方面比松耦合架构小, 但是存在着许多缺点: ① 使用范围有限, 3G 网络必须向 WLAN 开放自己的网络接口, 其网络的安全和商业利益有可能受到威胁, 只有这两个网络同属于一个运营商时才能使用紧耦合架构; ② 可扩展性不强, 将 WLAN 业务引入到 3G 网络中, 势必会影响 3G 网络的性能, 需要调整原有 3G 网络系统的网络部署和业务规划, WLAN 终端需要实现 3G 网络协议栈和使用 3G 网络规定的认证机制.

## (2) 松耦合网络架构

松耦合是指参与构成异构无线网络的无线接入系统以相互独立的、平等的方式集成在一起, 不存在任何从属关系. 以 3G 网络与 WLAN 互连互通为例, 3G 网络和 WLAN 之间没有从属关系, 各自独立组网. 网络间的移动性管理一般由网络层解决, 在用户更换接入网络时, 通过移动 IP 等技术来保持原有会话不中断, 并实现位置管理<sup>[70]</sup>. 与紧耦合方式相比, 松耦合方式在使用范围和可扩展性方面都具有先天的优势.

现有的松耦合架构主要包括: 直接互连的松耦合架构、基于专用核心网的松耦合架构和基于 IP 核心网的松耦合架构.

### ① 直接互连的松耦合架构

直接互连的松耦合架构, 以最直接的方式, 通过网关将各种无线接入系统两两连接起来. 例如, 文献<sup>[71]</sup>提出利用专用的 GPRS-WLAN 移动网关 (GWMG) 实现 GPRS 与 WLAN 之间的互连. 在该架构中, 必须在每两个接入系统之间部署专用的网关来实现异构系统间的互连, 而且要求任意两个无线接入系统之间建立服务等级协议 (Service Level Agreement, SLA).

### ② 基于专用核心网络的松耦合架构

基于专用核心网络的松耦合架构, 通过建立专用的第三方核心网络, 将各种无线接入系统都连接到专用核心网络中. 例如, 在 MIRAI 计划<sup>[72]</sup>和 SMART 计划<sup>[73]</sup>所提出的网络架构中, 需要建立两个专用核心网络, 即基础接入网和公共核心网. 其中, 基础接入网负责为多模终端提供统一的控制/信令信道, 协助多模终端完成位置更新和网络发现等过程, 而公共核心网则承担着各无线接入系统之间的数据交换以及整个网络中的资源管理、用户身份认证和用户信息管理等功能.

### ③ 基于 IP 核心网络的松耦合架构

基于 IP 核心网络的松耦合架构则无需建立专用的核心网络, 而是利用覆盖范围遍及全球的 Internet 作为核心网络, 并将 IP 或 IPv6 协议作为异构系统之间的互连协议. 例如, BRAIN 计划所提出的 BRAIN 架构<sup>[64]</sup>、文献<sup>[74]</sup>的 AMC 架构、文献<sup>[75]</sup>的 NGMN 架构.

文献<sup>[74]</sup>提出了一种基于 IP 和可信第三方的泛在移动通信架构 AMC (Architecture for ubiquitous Mobile Communications), 如图 4 所示. 该架构中新定义了两种网络实体: 网络互操作代理 (Network Interoperating Agent, NIA) 和交互网关 (Interworking Gateway, IG). 第三方的 NIA 具有认证、计费、切换管理、运营商间签订的 SLA 信息数据库等功能模块; IG 则具有认证、计费、流量管理、无缝漫游、移动 IP 外地代理、移动性管理等功能模块. 异构的接入系统通过各自的 IG 与 NIA 相连, 并通过 NIA 实现异构接入系统间的 IG 交互, 配合完成垂直切换所要求的认证、授权、计费功能以及移动 IP 注册过程等.

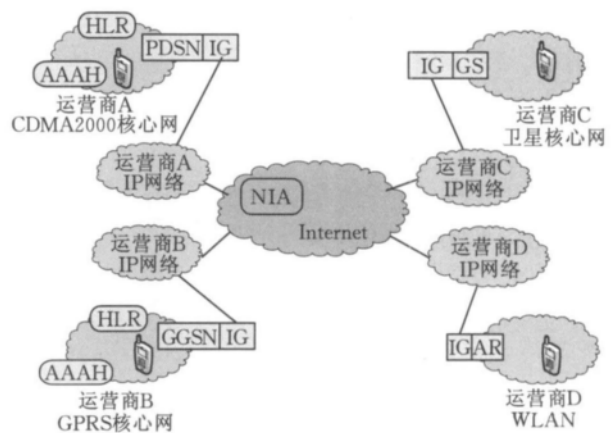


图 4 基于 NIA 的泛在移动通信架构 AMC

文献<sup>[75]</sup>给出了一种下一代移动网络 (Next Generation Mobile Network, NGMN) 的分层体系结构, 通过基于 IPv6 架构的统一网络平台实现多种无线接入网络的融合, 如图 5 所示. 3G 网络、WLAN 等不同接入网络的基站或接入点连接到接入路由器 (Access Router, AR), 而这些 AR 则向上连接到移动锚点 (Mobility Anchor Point, MAP). 每个 MAP 构成一个域, 带有本地用户归属服务器 (Home Subscriber Server, HSS)、以及认证、授权和计费服务器 (Authentication, Authorization and Accounting, AAA), 包含与其连接的多个 AR 及其所属的基站和接入点. 每个接入网关 (Gateway, GW) 连接多个 MAP, 为域间切换提供支持.

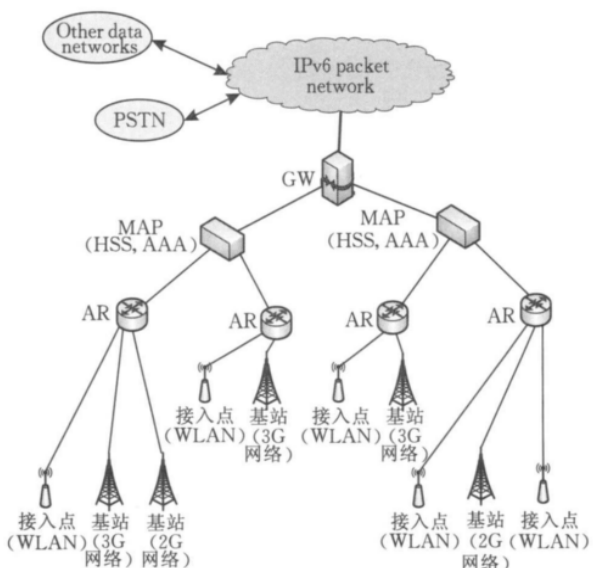


图 5 基于 IPv6 的 NGMN 分层体系结构

3 种松耦合架构的对比如表 1 所示. 对于直接互连的松耦合架构, 每两种异构系统都需要实现互连, 技术复杂度高, 网络的可扩展性很差, 同时也导致了网络建设成本高和建设周期长. 因此, 这种架构只适用于数目很少的无线接入系统间的互连. 基于专用核心网络的松耦合架构不需要在每两个无线接入系统之间建立直接连接, 只需通过每个无线接入系统与核心网络的连接来实现异构系统间的间接互连. 同时, 每种无线接入系统只需与第三方建立服务等级协议, 而不必与所有其它的无线接入系统建立服务等级协议, 与直接互连的松耦合架构相比, 具有很好的可扩展性. 然而, 建立专用核心网络, 其技术复杂度高, 建设成本高, 建设周期长. 基于 IP 核心网络的松耦合架构, 不仅具有很好的可扩展性, 还能够充分利用现有的 Internet 网络基础设施, 从而有效地降低异构无线网络的技术复杂度、降低建设成本、缩短建设周期. 综上所述, 基于 IP 核心网络的松耦合架构在可扩展性、技术复杂度、建设成本和建设周期这 4 个方面体现出明显的优势. 因此, 该架构能够在学术界和业界取得广泛的共识, 被认为是未来异构网络融合最有可能的架构形式.

表 1 松耦合架构对比

松耦合架构	可扩展性	技术复杂度	建设成本	建设周期
直接互连	差	高	高	长
基于专用核心网络	好	高	高	长
基于 IP 核心网络	好	低	低	短

3.2 移动性管理

未来的接入网络将是多种接入技术共存、相互补充的异构无线网络. 如何实现异构无线网络间的

无缝切换是移动性管理需要解决的首要问题. 在异构无线网络中, 由于接入技术的复杂多样性, 完全基于物理层和链路层来提供移动性管理非常困难, 需要一种通用的协议在网络层提供异构接入网络间的位置管理、寻呼和切换等操作, 屏蔽不同种类的无线接入网络的差异. IP 移动性管理<sup>[59]</sup>能够为移动终端在异构无线网络环境中的漫游提供了统一的解决方案, 但是其作为网络层的移动性管理, 将底层网络视作透明, 没有搜集底层网络相关信息的途径, 会存在网络发现不够及时、网络选择不够准确等问题, 切换延迟也较大. 因此, 在异构无线网络环境中, 有必要在二层协议和三层协议之间提供一套与媒体无关的切换技术, 与 IP 移动性管理协议相结合, 共同实现无缝的移动性管理. IEEE 在 2003 年 1 月启动了相关的研究, 并于 2004 年 1 月成立了 IEEE802. 21 媒体独立切换工作组, 致力于开发一个媒体无关的切换标准<sup>[76]</sup>.

(1) IP 移动性管理

移动 IPv6 (Mobile IPv6, MIPv6)<sup>[77]</sup> 是 IP 移动性管理中的一种基本技术, 能够满足移动终端在 IPv6 网络范围内随意移动和漫游的需求. MIPv6 协议有着足够大的地址空间和较高的安全性, 能够实现自动的地址配置并有效解决了三角路由问题, 但是其存在着切换延迟长、数据丢包率高和信令开销大等问题. 为了解决这些问题, IETF 工作组对 MIPv6 进行改进, 分别提出了分层移动 IPv6 (Hierarchical MIPv6, HMIPv6)<sup>[78]</sup> 和移动 IPv6 快速切换 (Fast Handover for MIPv6, FMIPv6)<sup>[79]</sup>. HMIPv6<sup>[78]</sup> 通过引入移动锚点 (Mobility Anchor Point, MAP) 来实现分级管理, 即当终端在 MAP 域内运动时, 只需向 MAP 发送绑定更新消息进行本地注册即可, 从而减小终端与区域外网络间的信令交互的开销. FMIPv6<sup>[79]</sup> 则针对移动 IPv6 中移动检测、新转交地址配置和绑定更新等过程带来较大切换延迟的问题, 通过引入链路层移动预测机制, 在终端切换到新网络前完成移动检测、转交地址配置与重复地址检测过程, 从而减小切换延迟.

上述 MIPv6 及其改进协议在实现移动性管理时要求终端必须支持 MIPv6 功能, 增加了部署和管理的复杂度, 加大了终端的能耗. 为此, IETF 于 2004 年成立工作组致力于研究基于网络的区域移动性管理协议, 并于 2008 年推出 PMIPv6 (Proxy Mobile IPv6) 规范<sup>[80]</sup>. PMIPv6 协议新增了两种功能实体: 移动接入网关 (Mobility Access Gateway,



MAG) 和本地移动锚点 (Local Mobility Anchor, LMA), MAG 负责检测终端的连接和离开以及初始化终端向 LMA 的绑定注册过程; 而 LMA 则负责维持移动终端的可达状态。因此, 该协议不需要终端参与任何与 IP 移动相关的信令流程, 简化了终端操作; 同时, 该协议还具有信令开销小、切换时延短、可扩展性高等优势。但是, 该协议只能在区域内为终端提供移动性支持, 如何与 MIPv6 结合, 提供高效的全局移动性支持, 还需要进一步的研究<sup>[59]</sup>。

### (2) 媒体独立切换协议

媒体独立切换 (Media Independent Handover) 协议<sup>[76,81]</sup>, 即 IEEE 802.21 协议, 主要解决的是异构网络 (包括 IEEE 802 网络和非 IEEE 802 网络) 之间的切换与互操作的问题。该协议对现有的物理层和 MAC 层没有做任何修改, 也不需要新的上层移动性管理协议的支持, 其核心思想是在 MAC 层 (2 层) 和网络层 (3 层) 之间引入一种新的功能模块, 即媒体独立切换功能 (Media Independent Handover Function, MIHF)。如图 6 所示, MIHF 模块作为 2.5 层, 与上层、底层都有接口, 可以传递切换所需的信息。上层可以是一些移动性管理协议, 如 MIPv4、MIPv6、mSCTP、SIP 等; 底层包括各种无线或有线的接入协议, 如 802.3、802.11、802.16、3GPP 等。MIHF 模块将来自底层或对等模块的、异构的切换相关信息以统一的格式提供给上层决策模块, 从而使得上层能够综合所有切换相关信息进行切换判决。同时, MIHF 模块还将上层的指令发送给对应的 MAC 协议以控制接口的切换等操作。MIHF 模块主要提供 3 种类型的服务: 媒体无关的事件服务、媒体无关的命令服务和媒体无关的信息服务。事件服务主要是向上层提供链路特征、状态等信息, 使得上层能够实时掌握底层状况; 命令服务主要是向底层下发切换相关操作的指令, 使得底层更好

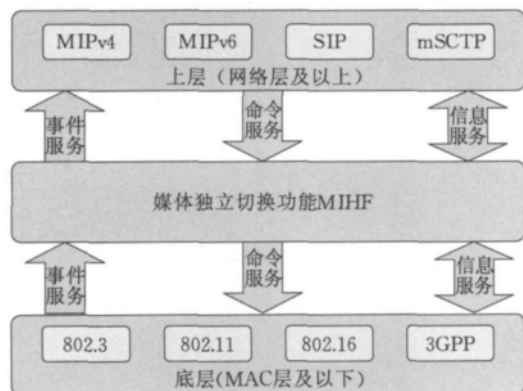


图 6 MIH 功能

地理解和支持上层决策; 信息服务主要是发现并获取网络相关信息 (网络类型、运营商、接入点相关信息等), 用以协助切换。

### 3.3 无线局域网

WLAN 是移动互联网中一种重要的无线接入方式, 具有带宽高、部署成本低等优势, 可以和 3G 网络形成技术上的互补。目前, WLAN 在全球得到广泛部署, 覆盖区域已经从热点分布向大面积热区分布发展。

传统的 WLAN 采用 AP 与有线交换机直接连接的组网方式, 其中 AP 独立完成用户的无线接入、权限认证、安全策略实施, 被称为“胖”AP。随着越来越多企业和运营商开始大规模 WLAN 的建设, 这种基于“胖”AP 的组网方式日益暴露出许多突出的问题。由于网络没有集中式的管理功能, 需要以手动方式逐一对 AP 进行配置、管理与监控, 大规模 WLAN 由成百上千个 AP 组成, 网络管理的负担非常大。另外, AP 设备通常位于室外, 物理安全无法得到保证, 将所有功能都在 AP 中实现, 包括认证、加密等一些安全配置, 会使得 AP 成为泄密渠道。为了解决上述问题, 满足网络可扩展性和安全需要, 各大厂商推出了基于集中控制型架构的 WLAN 解决方案, 即无线控制器 (Access Controller, AC) + “瘦”AP 的模式, 简称 AC-AP 架构, 如图 7 所示。AC-AP 架构对 WLAN 的功能进行了重新划分, 无线控制器负责无线网络的接入控制、AP 的配置监控、漫游管理、安全控制等功能; 而“瘦”AP 只负责 802.11 报文的加解密、802.11 的 PHY 功能等简单功能。由于 WLAN 功能被分散到 AC 和“瘦”AP 两个独立的设备上, 需要 AC 和“瘦”AP 之间通过相应的交互控制协议来协同完成, 该协议是 AC-AP 架构的核心。

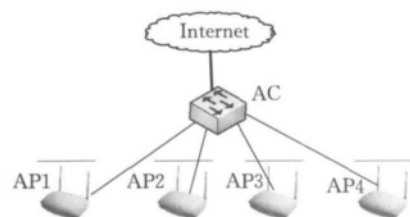


图 7 基于 AC-AP 架构的 WLAN

到目前为止, AC-AP 交互控制协议没有公认的国际标准, 各厂商在实现上都采用私有协议, 因而不同厂家的 AC 和 AP 产品无法实现互通。出于对未来 WLAN 网络互通性的考虑, IETF 成立了

CAPWAP (Control And Provisioning of Wireless Access Points) 工作组, 进行 AC-AP 架构及 AC-AP 交互控制协议技术的研究, 制定统一的 AC-AP 交互控制协议. 在工作组成立最初, 有 4 个候选协议被推选出来作为 CAPWAP 协议的草案初稿, 它们分别是轻量接入点协议 (Light Weight Access Point Protocol, LWAPP)<sup>[82]</sup>、安全轻量接入点协议 (Secure Light Access Point Protocol, SLAPP)<sup>[83]</sup>、CAPWAP 隧道协议 (CAPWAP Tunneling Protocol, CTP)<sup>[84]</sup>、无线局域网控制协议 (Wireless LAN Control Protocol, WiCoP)<sup>[85]</sup>. 经过深入研究, LWAPP 协议因为和工作组定义的目标最为相近, 且协议本身比较完善而最终被采纳, 作为工作组草案的基础标准.

CAPWAP 协议<sup>[86-87]</sup>于 2009 年提出, 该协议将整个 WLAN 网络分成 AC 和“瘦”AP 两个部分. AP 可以看作是 AC 的远程端口, 接受 AC 的控制. AP 的部分功能迁移到 AC 上, 即采用分离 MAC 设计, 实时帧交换与 MAC 管理的一些实时部分在 AP 中完成, 而认证、安全管理以及移动性管理则由 AC 处理. AP 收到移动终端的数据, 通过 CAPWAP 协议封装传至 AC. AC 通过 CAPWAP 控制隧道实现对 AP 的集中控制与管理. 因此, CAPWAP 协议规范了 AP 与 AC 的通信行为, 实现对 AP 的集中控制与管理. 该协议有 4 个运行阶段, 其流程如图 8 所示:

(1) 发现 AC. AP 对网络上存在的 AC 进行发现, 获取其当前负荷状况、工作能力等信息.

(2) 加入 AC. 从发现的 AC 中选择最佳 AC, 并建立控制隧道.

(3) 固件升级. AP 根据 AC 要求的固件版本号进行匹配升级, 然后重启.

(4) 正常运行. 与 AC 交互, 获取 AP 的配置参数, 建立数据隧道, 接收来自 AC 和终端的数据信息.

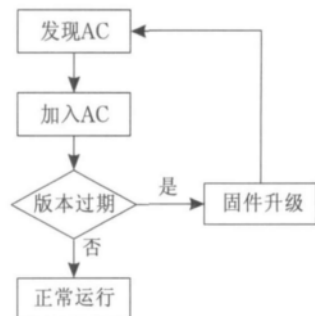


图 8 CAPWAP 协议流程

OpenCAPWAP<sup>[88]</sup>是 CAPWAP 协议的开源实现. 文献<sup>[88]</sup>描述该开源软件的架构并给出性能测试, 其结果表明该软件能够在现实环境中使用, 可实现对网络的管理、监控和配置. Bernaschi 等人<sup>[89]</sup>针对大规模 WLAN 环境中的频率规划问题, 提出了一种基于 OpenCAPWAP 的解决方案, 实验结果表明该技术方案能有效地提高网络性能.

### 3.4 无线 Mesh 网络

无线 Mesh 网络<sup>[58]</sup> (Wireless Mesh Networks, WMN) 是一种自组织、自配置的多跳无线网络, 其网络结构如图 9 所示. 在 WMN 中, Mesh 路由器 (Mesh Router, MR) 以无线互连的方式构成无线骨干网, 少数作为网关 (Gateway) 的 MR 以有线方式连接到 Internet. MR 不仅作为 AP 为其覆盖范围内的移动终端提供无线连接, 还作为路由器为其它 MR 转发报文. 移动终端 (Phone, PDA 等) 与覆盖其区域的 MR 建立连接, 并以无线多跳的方式通过

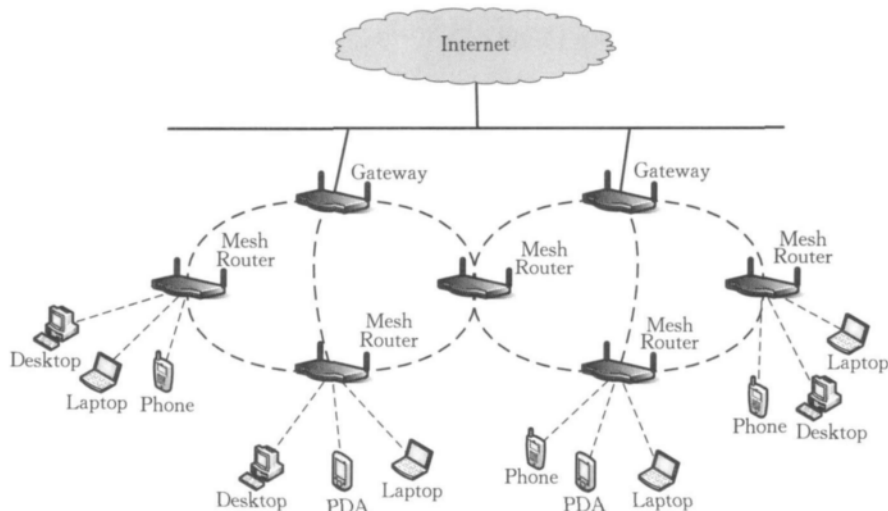


图 9 无线 Mesh 网络结构

网关实现 Internet 接入. 与传统的 WLAN 相比, WMN 有着许多优势: (1) 由于只需要很少的有线网络连接点(网关), 网络的布线成本大大降低; (2) 多跳无线通信提供了更广的无线覆盖范围; (3) 无线骨干网中多点到多点的连接, 增强了网络的可靠性; (4) MR 之间自动建立和维护连接, 易于网络的增量部署, 网络具有很好的可扩展性.

为了推动 WMN 技术的发展, IEEE802 的多个标准组正在制定相关的标准, 这些标准已经出现在 IEEE 802.11s、802.15、802.16 和 802.20 中<sup>[90]</sup>. 其中, IEEE 802.11s 协议<sup>[91]</sup>则是专为 WMN 所制定的, 其主要目的在于拓展 WLAN 的覆盖范围, 通过扩展 802.11 MAC 层协议, 构建扩展业务集合(Extended Service Set, ESS)下的 WMN, 在 AP 间建立无线连接, 使得多个 AP 之间能够通过自动配置拓扑来组网, 支持单播、广播及组播业务. 目前 802.11s 协议草案正处于不断的修改完善中.

在学术界, WMN 受到了广泛的关注和深入的研究, 涉及网络的性能、安全、管理等多方面的问题<sup>[58]</sup>, 其中网络性能优化是学者们研究的重点. 关于如何提升和优化网络性能, 现有的研究工作主要包括高性能路由协议、信道分配、路由和信道分配联合以及拓扑规划.

#### (1) 高性能路由协议

路由协议控制着 WMN 骨干网中的报文传输路径. 最短路径路由协议没有考虑到链路质量、链路稳定性及信道干扰等重要因素, 导致较差的网络性能(吞吐量、延迟、丢包率等). 因此, 需要设计高性能的路由协议, 其路径选择机制要综合考虑上述的链路因素. 现有的 WMN 路由协议主要有以下几种:

① 链路感知路由. 使用基于链路质量的路由判据, 如期望传输次数(Expected Transmission Count, ETX)<sup>[92]</sup>、期望传输时间(Expected Transmission Time)<sup>[93]</sup>等.

② 负载感知路由. 考虑到节点负载对路径性能的影响, 选择负载较小的路径, 如负载均衡 Ad Hoc 路由协议(Load Balanced Ad Hoc Routing, LBAR)<sup>[94]</sup>、动态负载感知路由(Dynamic Load-Aware Routing, DLAR)<sup>[95]</sup>等.

③ 干扰感知路由. 在多信道 WMN 中, 路径的信道差异是路径选择时需要考虑的一个重要因素. 为了最小化数据流的流内干扰, 使得传输路径的邻近跳尽可能地在不同信道上通信, Draves 等人<sup>[93]</sup>提出了一种干扰感知路由判据, 即加权积累 ETT

(Weighted Cumulative ETT, WCETT). 但 WCETT 没有考虑数据流的流间干扰. 为此, Yang 等人<sup>[96]</sup>提出了干扰和信道切换的等压性判据(Metric of Interference and Channel switching, MIC).

④ 多径路由. 多路径路由是指在源节点和目的节点之间发现和使用多条路径, 主要有以下两种方式: (i) 对流量进行分割并在多条路径上并发传输, 从而获得较高的网络吞吐量并实现负载均衡<sup>[97]</sup>; (ii) 从多条路径中选择一条作为主路径进行数据传输, 其余路径作为备份路径, 从而增强路由的容错能力<sup>[98]</sup>.

#### (2) 信道分配

早期的 WMN 采用单信道 MAC 层协议, 每个 MR 只配备一个无线射频接口, 当邻近区域中的多条链路同时传输时, 会产生干扰导致网络传输性能的下降. 因此, 单射频单信道限制了网络容量. 为解决这一问题, WMN 使用多个正交信道接入模式, 每个 MR 配备多个无线射频接口<sup>[99]</sup>, 每个射频接口对应一个正交信道. 这样, 每个节点就可以同时在不同的信道上与其它节点进行通信, 并且邻近区域中的多条链路也可以在不同的信道上并发传输. 理论和实验<sup>[100]</sup>表明信道数量和射频接口数量的增加可显著提高网络容量. 但是由于信道资源有限, 如 IEEE 802.11b/g 和 IEEE 802.11a 标准提供的正交信道数量分别为 3 和 12, 链路干扰仍然是制约网络容量的一个重要因素. 这就需要一个高效的信道分配方法来提高信道资源的利用效率.

目前, 国内外关于信道分配已经做了大量的研究, 取得了很多研究成果. 现有的信道分配方法按射频接口切换策略的不同可分为 3 类:

① 静态分配. 射频接口所占用的信道在长时间内保持不变. Raniwala 等人<sup>[101]</sup>提出了一种集中式的、基于贪心思想的负载感知信道分配算法, 根据最小的干扰度来分配信道. 这里的“干扰度”指的是在干扰域中被分配了相同无线信道的虚拟链路上预计负载的总和. Ramachandran 等人<sup>[102]</sup>提出了基于干扰感知的集中式分配算法, 各节点依据测得的链路干扰值和信道使用情况计算信道排名, 然后从网关开始, 按照广度优先遍历的顺序根据信道排名情况对各节点的射频接口进行信道分配.

② 动态分配. 射频接口所占用的信道会动态切换. Wu 等人<sup>[103]</sup>提出了动态信道分配算法 DCA, 该算法要求每个节点将一个射频接口绑定在预先定义的公共信道上用于信道协商, 其余射频接口用于发

送或接收数据. 源节点在数据发送前使用公共信道与目的节点进行协商, 完成信道协商后就可以选择一个空闲的射频接口并将其切换到协商好的信道上进行数据传输.

③ 混合式分配. 静态分配和动态分配相结合. Kyasanur 等人<sup>[104]</sup>提出了一种混合信道分配算法, 将节点的射频接口分为两类, 包括用于数据接收的固定射频接口和用于数据发送的可变射频接口, 固定射频接口所占用的信道在一段时间内保持不变, 源节点向目的节点发送数据前, 需要将其可变射频接口的信道切换到目的节点的固定射频接口所使用的信道. 对于固定射频接口所占用的信道, 该算法以均衡同一冲突域中使用相同信道的节点数目为原则进行分配.

### (3) 路由和信道分配联合

路由和信道分配有着很密切的关系, 为了最大限度地提高网络性能, 应该同时考虑这两个问题, 而不是分开处理. 因此, Alicherry 等人<sup>[105]</sup>提出了一种联合路由、信道分配和链路调度的 RCL 算法(Routing, Channel-assignment and Link-scheduling, RCL), 实现网络吞吐量的最大化. 文中使用整数线性规划对联合路由和信道分配问题进行形式化描述, 充分考虑网络中信道数量, 每个 MR 的射频接口数量以及链路干扰. 首先, 利用线性规划松弛技术对问题进行求解, 得到路由和信道分配方案, 由于将整数线性规划放宽至线性规划, 该方案未必可行; 其次, 调整信道分配以获得一个可行的方案, 同时保持路由方案不变, 使得网络吞吐量不会减少. Mohsenian-Rad 等人<sup>[106]</sup>针对联合逻辑拓扑设计、接口分配、信道分配和路由问题, 首先使用混合整数线性规划方法对问题进行建模; 在此基础上, 提出一个基于迭代局部搜索的启发式求解算法. Gardellin 等人<sup>[107]</sup>则利用分治法来解决联合路由和信道分配问题.

### (4) 拓扑规划

路由和信道分配是针对给定的 Mesh 骨干网拓扑进行网络性能优化. 由于不合理的骨干网拓扑会极大地限制网络性能的优化, 拓扑规划研究同样具有重要意义. 现有的研究工作主要集中在 Mesh 路由器部署和网关部署两个方面:

① Mesh 路由器部署. 确定 MR 的数量和位置, 以最小的部署成本满足用户覆盖需求和网络连通性要求. Srinivas 等人<sup>[108]</sup>提出了二阶段部署算法来构建一个 Mesh 骨干网, 在第一阶段使用矩形条覆盖算法来部署节点, 完成区域覆盖; 第二阶段通过构建

最少 Steiner 节点的 Steiner 树来实现节点间的连通. Robinson 等人<sup>[109]</sup>研究非均匀传播模型下的 Mesh 路由器部署问题, 考虑了无线信道的非均匀传播模型, 链路存在与否取决于两节点之间的信号质量估计, 将 Mesh 路由器部署问题形式化为终端 Steiner 树问题, 提出了近似算法, 最小化 MR 节点数量的同时, 使用最小次数的链路测量来确保所有骨干网链路是连通的.

② 网关部署. 在 MR 位置已经确定的前提下, 确定网关的数量和位置, 以最小的部署成本为所有 MR 提供 QoS 保证的 Internet 接入服务. Bejerano<sup>[110]</sup>提出了一种基于分簇的网关部署算法, 将 WMN 中的 MR 分成最小数量的不相交的簇, 每个簇中的簇头节点便是网关. 在每个簇中, 建立以网关为根的生成树, 簇中各节点以生成树中的路径来进行数据转发. Drabu 等人<sup>[111]</sup>提出了一种分离-合并-转移(split-merge-shift)算法来最小化簇的数量. 该算法首先以迭代的方式选择度数最大的节点构建单跳(one-hop)簇, 然后对节点数量较少的簇进行合并; 当不存在可合并的簇时, 将节点数量较少的簇分离成单点簇, 并通过转移操作并入到其它簇中, 从而实现网关数量的最小化.

## 4 应用服务

应用服务是移动互联网的核心. 移动互联网服务, 不同于传统的互联网服务, 具有移动性和个性化等特征: 用户可以随时随地获得移动互联网服务; 这些服务可以根据用户位置、兴趣偏好、需求和环境进行定制. 随着 Web 2.0 技术的发展, 让用户从信息的获得者变为信息的贡献者, 移动互联网的应用服务也日益繁荣. 苹果公司于 2008 年 7 月推出在线应用商店, 依托苹果的 iPhone 和 iPod Touch 的庞大市场取得了极大的成功.

应用服务研究包括移动搜索、移动社交网络、移动电子商务、移动互联网应用拓展、基于云计算的服务、基于智能手机感知的应用等<sup>[112-117]</sup>. 本文将重点介绍移动搜索和移动社交网络的研究进展.

### 4.1 移动搜索

移动搜索是一种典型的移动互联网应用. 移动搜索是基于移动网络的搜索技术, 是指用户通过智能手机、PDA 等移动终端, 采用浏览器、短信、交互式语音应答(Interactive Voice Response, IVR)等多种方式搜索, 获取所需的信息和服务(文本、图像、动

画、声音、视频等)。作为传统互联网搜索的进一步延伸,移动搜索可为用户提供随时随地的、个性化的信息服务<sup>[112]</sup>。以 Google、Baidu 为代表的搜索引擎门户已相继推出了移动搜索服务,让用户可以通过手机进入 WAP 或 WEB 进行网页搜索。

移动搜索不同于传统互联网搜索,除了终端的移动性,还表现在以下两个方面:

#### (1) 用户操作的便捷化和结果显示的简约化

由于移动终端的处理能力较弱、屏幕较小、电池电量有限、键盘操作不便以及无线接入网络的带宽有限等诸多因素,移动搜索更注重用户操作的便捷化和结果显示的简约化。Kamvar 等人<sup>[118]</sup>提出了一种智能的查询输入补全方法,在用户输入的过程中,根据用户的上下文信息,如用户位置,当前时间、日期等,对单词进行预测和补全,使得用户的按键次数最少。Jones 等人<sup>[119]</sup>提出了一种基于关键词的查询结果显示方式来替代基于标题的显示方式。这种方式更加简洁、有效,能使用户迅速、准确地找到所需信息。对于关键词获取,文中提出了一种从文档中自动抽取关键词的方法。Karlson 等人<sup>[120]</sup>通过对大规模数据集进行层次分类,利用迭代过滤的方法进行内容导航,使得用户以最少的操作准确地获取所需信息。

#### (2) 个性化

个性化是移动搜索的一个重要特点。由于移动终端与用户绑定,移动搜索可结合用户的搜索记录、搜索习惯等能反映其偏好的信息,对搜索结果进行分析筛选,为用户提供最符合个人兴趣的信息;同时,移动终端具有 GPS、摄像头等多种感知设备,可以对用户上下文(位置、环境等)进行感知,移动搜索可以根据用户上下文提供最符合用户需求的信息。

个性化搜索通过对用户偏好、用户上下文进行建模来理解用户的信息需求,并在此基础上,对搜索结果进行优化。Pretschner 等人<sup>[121]</sup>提出了一种基于本体的个性化搜索方法,用基于本体的用户配置文件来对用户偏好进行建模,然后在用户搜索时结合用户查询输入和用户配置文件对搜索引擎的返回结果重新排序。由于移动终端的特点,移动搜索中的用户相关信息可以通过感知自动获取,即上下文感知。基于上下文感知的个性化搜索就是在搜索过程中考虑用户的上下文信息,向用户推送与其当前上下文相关的信息<sup>[122]</sup>。Coppola 等人<sup>[123]</sup>提出了一种移动搜索框架 Context-aware Browser,不同于用户向搜索引擎输入查询请求的模式,该系统能自动感知用户的上下文信息(如位置、时间、身份等),推断出用

户当前的行为活动和查询需求,进行主动搜索,并将相关信息推送给用户。目前,应用商店里的应用服务的数量呈现出爆炸性增长的态势,用户通过浏览的方式寻找自己感兴趣的应用服务逐渐变为不可能。因此,Yan 等人<sup>[124]</sup>提出了一种个性化的应用服务推荐系统 AppJoy。

## 4.2 移动社交网络

社会网络(Social Network)的理论基础是哈佛大学的心理学教授 Stanley Milgram 于 1967 年提出的六度分隔理论(Six Degree of Separation),“每个人最多只需要通过 6 个人就能认识任何一个陌生人”<sup>[125]</sup>。社交网络服务(Social Network Services, SNS)是一种互联网应用,旨在为一群存在社会关系或拥有共同兴趣的、以各种形式在线聚合的用户提供信息共享与交互服务。当前,出现了许多著名的提供 SNS 的社交网站,如 Facebook、MySpace 等。

随着移动互联网的发展,SNS 开始逐渐面向移动终端用户。移动 SNS 无缝地将移动计算和社会计算结合起来,极大地增强了用户的真实性、地域性和交互的实时性<sup>[126]</sup>。移动终端与用户的绑定保证了社交网络的真实性;位置信息的引入,带来了多样化、个性化的社交网络服务;移动终端“永久在线”,可以提供用户间的实时交互。另外,移动终端可以利用用户的历史位置信息以及与其它用户相遇的历史记录(蓝牙等短距离无线通信的服务发现)来感知社会上下文,并实现基于社会上下文的应用<sup>[127]</sup>。

移动 SNS 应用是目前的一个研究热点。现有的移动 SNS 应用大致可分为集中式和分布式两类。

#### (1) 集中式的移动 SNS

集中式的移动 SNS 大多数基于 Internet,将用户数据存储在中心服务器上,允许用户通过手机客户端来寻找好友和共享数据。Social Serendipity<sup>[128]</sup>是一种典型的集中式移动 SNS 应用。用户个人信息存储在中心服务器上,并建立与其终端上蓝牙接口的 MAC 地址的映射。移动用户通过蓝牙来发现周围的某个“陌生人”,获得它的蓝牙 MAC 地址,并将其提交给中心服务器,查找该用户个人信息,若中心服务器查到相应的信息,则对这两个用户的信息做一个相似度计算,得出一个分值(若分值大于用户设定的阈值,中心服务器则认为两个人有共同的兴趣爱好)。中心服务器根据这个分值向用户发送查询结果消息,用户根据这个消息就可决定是否去认识这个“陌生人”。PeopleTones<sup>[129]</sup>增强了邻近区域中朋友之间的感知和交互功能,系统获取用户当前的位

置,并通知给他的好友们. Micro-blog<sup>[130]</sup> 是一种全球信息共享、浏览和查询平台,该平台将用户智能手机传感器所获取的各种信息上传到服务器,然后平台用户可以根据自身需要查询相应区域内的各类实时信息.

## (2) 分布式的移动 SNS

分布式的移动 SNS 采用移动终端间直接交互的方式,不需要第三方服务器的支持. 例如, People-Net<sup>[131]</sup> 是一种基于智能手机的分布式信息查询匹配系统,它的核心思想就是通过智能手机之间的交互从朋友以及朋友的朋友那里获取所需的信息. 每个用户的智能手机上有一个数据库,存放相关信息;从地理上将城市划分为多个不同功能的社区,如体育、汽车等;用户的查询请求首先通过蜂窝移动通信网络传到相关的社区,然后随机找几个用户,在该社区中进行分布式的查询匹配. 相比于集中式的系统,该系统不需要服务器对大量的信息进行集中存储,且用户获得的信息具有很好的时效性、地域性和社区性. E-SmallTalk<sup>[132]</sup> 是一种在物理邻近区域中提供 SNS 的分布式系统,能够自动发现移动用户的共同兴趣和话题. 移动用户通过蓝牙来交互相关信息,并进行信息匹配,找出共同感兴趣的话题.

综上所述,集中式的移动 SNS 虽然易于大规模的部署和应用,但存在着以下两个问题:首先,用户需要将个人信息提交给中心服务器,这个过程中存在隐私泄露的威胁;其次,中心服务器上的用户信息是相对静态的,不能实时地反映周边环境的动态变化. 而分布式的移动 SNS 虽然在隐私泄露和信息实时性等方面具有优势,但会受到网络连通性、带宽、能耗等因素的限制.

## 5 安全与隐私保护

安全与隐私保护是移动互联网所面临的一大紧迫问题,已经成为影响其发展的重要因素之一. 在移动互联网环境下,传统互联网中的安全问题依然存在,同时还出现了一些新的安全问题.

安全与隐私保护研究涉及移动终端、接入网络和应用服务 3 个层面,包括移动终端安全、无线网络安全、应用安全、内容安全、位置隐私保护等<sup>[133-136]</sup>. 本文将重点介绍移动终端安全和位置隐私保护的研究进展.

### 5.1 移动终端安全

由于移动终端的特点,移动终端安全问题与传

统的 PC 安全相比,存在以下一些区别:(1) 由于移动终端的计算和存储能力有限,一些安全防护技术的开发存在很大局限性,例如,不可能采用复杂的加密算法、无法存储较大的病毒库等;(2) 移动终端上恶意软件的传播途径更多样化,隐蔽性也较高;(3) 移动终端“永远在线”的特性使得窃听、监视和攻击行为更加容易;(4) 移动终端电池电量有限,因此,在设计安全防护方法时,能耗也是需要考虑的重要因素.

目前,恶意软件(如病毒、木马等)已对移动终端的安全构成重大威胁. 移动终端的内存和芯片处理能力的不断增强给了恶意软件更多的生存空间;开放的操作系统和应用编程接口极大地方便了恶意软件的开发和入侵;同时,移动用户日趋增加,为恶意软件的传播创造了环境. 因此,如何进行恶意软件的检测和防护,是实现移动终端安全所亟需解决的问题.

在工业界,很多杀毒软件厂商都推出了移动版的杀毒软件,如 ESET、Kaspersky、McAfee、Norton 等,不过它们的核心技术仍然是传统的基于特征码的检测方法;在智能终端操作系统方面,很多操作系统都加强了权限控制,例如在最新的 Symbian 操作系统中,程序运行某项功能时,必须要有授予相应权限的证书的签名<sup>[137]</sup>. 在学术界,学者们在恶意软件的检测和防护方面做了很多研究工作,取得了不少研究成果.

Bose 等人<sup>[138]</sup> 提出了一种行为检测框架,用以检测移动终端上的病毒、蠕虫、木马等恶意软件. 该框架通过训练一个基于支持向量机(Support Vector Machines, SVM)的分类器来辨别恶意软件行为和正常应用程序行为. Enck 等人<sup>[139]</sup> 针对 Android 系统提出一种轻量级的应用程序安全验证方法. 通过对 Android 系统的安全分析,产生一些可以匹配恶意软件特征的规则,并应用这些规则在程序的安装阶段发现和清除恶意软件. Kim 等人<sup>[140]</sup> 针对恶意软件的“能量耗尽”攻击,提出了一种基于能耗监控的检测方法,通过发现能耗异常来检测恶意软件. Cheng 等人<sup>[141]</sup> 提出了一种基于移动终端间协作的病毒检测和预警系统,从移动终端搜集其通信行为信息,通过联合分析来检测单个终端或整个系统的异常行为. 当检测到病毒存在时,给直接受其威胁的移动终端发送警报. 该系统采用基于代理的结构,对移动终端的处理负荷进行分流,并简化了移动终端之间的协作. Bickford 等人<sup>[142]</sup> 针对恶意软件检测带来移动终端额外能耗的问题,从攻击监控范畴和恶

意软件扫描频率考虑,提出了一种在安全与能耗之间折中的检测方法,只需消耗少量的额外能量,就能检测出绝大多数已知恶意软件的攻击。

## 5.2 位置隐私保护

用户位置涉及用户曾经去过哪里、做过什么或者即将去哪里、正在做什么,属于个人隐私。随着移动互联网中基于位置服务的应用越来越广泛,位置隐私保护逐渐引起了人们的重视。目前,学者们已广泛开展位置隐私保护的研究,提出了多种位置隐私保护方法,如制定位置信息的存储和访问规则<sup>[143]</sup>、隐藏用户身份与位置的关系<sup>[144]</sup>、位置匿名<sup>[145-150]</sup>等。

位置匿名是一种有效的位置隐私保护方法,其核心思想是:移动终端或第三方可信匿名服务器对用户的位置信息进行处理,使之不能重定位到用户的身份,然后将处理后的位置信息发送给服务提供者进行查询服务。

根据位置匿名化处理方法的不同,位置匿名技术可以分为以下3类:

(1) 位置  $k$  匿名。将用户位置隐藏在  $k$  个用户的位置集中。 $k$ -匿名<sup>[145]</sup>由美国卡内基·梅隆大学的 Latanya Sweeney 提出,最早使用在关系数据库的数据发布隐私保护中,使得一条数据表示的个人信息和至少其它  $k-1$  条数据不能区分。其主要目的是为了解决如何在保证数据可用的前提下发布带有隐私信息的数据,使得每一条记录都无法与确定的个人匹配。Gruteser 等人<sup>[146]</sup>最先将  $k$ -匿名的原理应用到位置隐私上来,提出了位置  $k$ -匿名。通过一种基于四叉树(Quadtree)的位置匿名算法,高效地找出满足位置  $k$ -匿名的位置集。该算法自顶向下地对提出查询的用户的周边区域进行划分,如果该用户所在区域的用户数大于  $k$ ,则将这个区域等分为4部分,重复该步骤,直至区域中所包含的用户数小于  $k$ ,则将这个区域作为该用户的匿名区域。

(2) 假位置。如果不能找到其它  $k-1$  个用户进行  $k$  匿名,则可以通过发布假位置达到以假乱真的效果<sup>[147]</sup>。用户可生成一些假位置(Dummies),并同真实位置一起发送给服务提供者。这样,服务提供者就不能分辨出用户的真实位置,从而使得用户位置隐私得到保护。其中,假位置和真实位置的距离则取决于用户在隐私度和服务体验方面的需求,假位置距离真实位置越远,服务体验越差,但隐私度越高。

(3) 空间加密。空间加密方法不需要向服务提供者发送其它的位置,而是通过对位置加密达到匿名的效果。例如,Khoshgozaran 等人<sup>[148]</sup>提出了一种

基于 Hilbert 曲线的位置匿名方法。其核心思想是将空间中的用户位置及查询点位置单向转换到一个加密空间,在加密空间中进行查询。该方法首先将整个空间旋转一个角度,在旋转后的空间中建立 Hilbert 曲线。用户提出查询时,根据 Hilbert 曲线将自己的位置转换成 Hilbert 值,提交给服务提供者;服务提供者从被查询点中找出 Hilbert 值与用户 Hilbert 值最近的点,并将其返回给用户。

基于位置服务的应用在满足用户位置隐私需求的同时,还需要给用户提供位置相关的信息服务。如何基于匿名后的位置为用户提供位置相关的查询结果也是一个重要问题。传统查询处理中查询对象都是一个位置点,而经过匿名处理之后的查询对象变成了一个匿名区域。因此,需要改进已有的方法或者提出新的查询处理方法。例如,查询距离用户当前位置最近的医院,由于用户的位置是一个匿名区域,需要计算该匿名区域中每个点的最近医院,使得查询结果集中包含用户所需的信息这个问题可以利用区域最近邻(Range Nearest-Neighbor)查询方法<sup>[149]</sup>来解决。

连续查询是基于位置服务中的一种常见并且重要的查询类型。不同于快照(snap shot)查询,连续查询具有位置频繁更新和时效性的特点,将上述的静态匿名算法应用于连续查询隐私保护时,会出现隐私泄露、匿名服务器负担过重、网络资源浪费等问题。针对这些问题,Pan 等人<sup>[150]</sup>提出了  $\delta_p$ -隐私模型和  $\delta_q$ -质量模型,解决了在用户查询有效期内如何选择进行位置匿名的时间点等难点问题,在连续查询中有效地实现了隐私保护与服务质量的均衡。

## 6 一个 WLAN 基站系统

近年来,我们在移动互联网领域开展了相关的研究工作,主要包括支持 CAPWAP、Mesh 和 PMIPv6 的 WLAN 基站原型系统以及无线 Mesh 网络性能优化的理论研究。

针对传统 WLAN 存在的覆盖范围有限、缺乏集中式统一管理、移动性支持能力弱等问题,我们研究 IEEE 802.11s Mesh 协议<sup>[91]</sup>、CAPWAP 协议<sup>[86-87]</sup>和 PMIPv6 协议<sup>[80]</sup>,设计并开发了一套支持 CAPWAP、Mesh 和 PMIPv6 的 WLAN 基站原型系统。该原型系统使用研祥 EC5-1712 工控板,板上集成 400 MHz FSB 的超低功耗 ULV Celeron-M 处理器,配置 512 MB 内存;采用两块无线网卡,一块 PCI



接口的 TP-LINK WN650G 用于终端接入,另一块 Mini-PCI 接口的 TP-LINK WN660G 则用于 Mesh 互连;存储则使用 8 GB 的 CF 卡. 根据上述硬件环境,在自定制 Linux 和开源无线驱动 Madwifi 的基础上,进行系统的设计与开发,总体架构如图 10 所示. 在 MAC 层之上,通过 802.1D Bridge 将用于终端接入的无线接口 ap0、用于 Mesh 互连的无线接口 mesh0 与以太网接口 eth0 桥接起来,实现 WLAN 接入网、Mesh 骨干网和有线网的互连互通. 遵循 802.11s 协议,在 MAC 层与 IP 层之间实现了 Mesh 发现与路由机制. 在应用层,实现了基于 CAPWAP 协议的 AP 管理,通过 CAPWAP 协议实现 AC 与 AP 的交互;通过 TFTP 协议从 AC 下载固件更新,使用 HOSTAPD 来配置 AP 认证方式;实现了基于 PMIPv6 协议的移动性管理,终端无需安装额外软件即可进行网络层的快速切换.

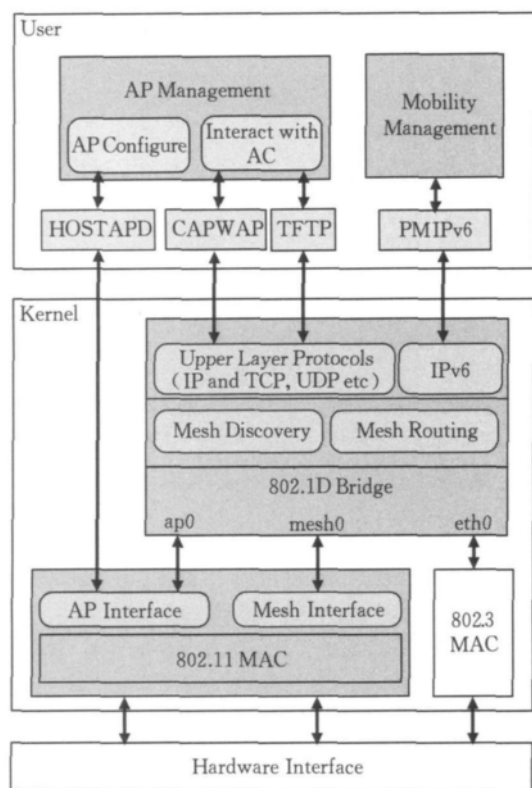


图 10 WLAN 基站系统架构

为优化无线 Mesh 网络性能,我们在拓扑规划和组播优化方面开展了相关理论研究工作. 针对节点部署成本最小化问题,提出了一种联合 Mesh 路由器部署和网关部署的节点部署模型<sup>[151]</sup>. 综合考虑覆盖 Mesh 路由器、转发 Mesh 路由器和网关这 3 种类型节点的部署,提出了高效的启发式算法,在保证网络性能的前提下,最小化节点部署成本. 针对网关部署中的负载均衡问题,在综合考虑部署成本、

MR-GW 路径长度等因素的基础上,提出了一个两阶段的负载均衡网关部署算法<sup>[152]</sup>:第 1 阶段为基于节点权重的网关选择贪心算法,第 2 阶段为负载均衡的 Mesh 路由器关联算法. 算法在不增加网关部署成本和 MR-GW 路径长度的基础上,实现了网关负载均衡. 针对网关部署中的可靠性问题,提出了网关部署的  $K$ -容错模型. 每个 Mesh 路由器可以与  $K$  个不同的网关关联,其中一个为主网关,其余为备份网关. 在此基础上,提出了一种  $K$  容错的网关部署算法<sup>[153]</sup>,只部署少量额外的网关就可实现网关容错. 针对组播中的传输时间和干扰最小化问题,提出了一种联合路由和信道分配的组播优化机制 MT3-DA<sup>[154]</sup>,该机制包含两个核心算法,即基于最小传输时间的组播树构建算法和最小化干扰的重叠信道分配算法,可实现较高的组播吞吐量.

## 7 总结与展望

作为当前的热点,移动互联网在近几年得到了广泛的研究. 本文分别从移动终端、接入网络、应用服务、安全与隐私保护 4 个方面阐述和分析移动互联网的研究进展,并介绍了作者在 WLAN 基站原型系统及无线 Mesh 网络性能优化方面的研究成果.

虽然移动互联网研究已经取得了一定的成果,但是仍有很多问题需要解决,集中体现在以下几个方面:

(1) 精确、无缝与低能耗的移动终端定位. 定位精度是一项非常重要的性能指标,现有的工作大多数只是针对某一种定位技术研究如何提高其定位精度. 在多种定位基础设施(如 3G 网络、WLAN 等)重叠覆盖的区域,如何综合利用多种定位技术(网络定位、感知定位等)提供更为精确的服务,是一个值得研究的问题. 一些大型的应用,既有室内场景,又有室外场景,需要分别采用室内与室外定位技术,定位服务的无缝化问题亟需解决,而问题的难点在于室外/室内的定位技术切换和统一的数据管理<sup>[31]</sup>. 定位作为移动终端上运行的一项功能,同样需要考虑能耗. 对于连续实时定位,能耗问题尤为突出<sup>[155]</sup>. 如何在定位的准确性和能耗上进行权衡,如何在不降低终端轨迹准确性的前提下尽可能地利用低能耗定位技术和降低定位使用频率,都是需要进一步研究的问题.

(2) 高效、动态的无线频谱资源管理与利用. 为解决日益增长的无线通信需求和有限的无线频谱资



源之间的矛盾,学者们一直致力于研究频谱资源的管理和利用,通过调制、编码、多信道、多天线、认知无线电等技术最大化频谱资源的利用效率。其中,认知无线电技术是当前研究的热点,在频谱感知和频谱分配上还存在着很多未解决的难题和挑战。在频谱感知方面,如何在编码、角度等维度上进行频谱检测以发现更多的频谱机会,如何在多用户合作感知时提高协同增益和减少系统开销,如何通过学习和预测的方法来估计频谱的占用状况以降低感知开销,都是值得深入研究的问题;在频谱分配方面,如何综合考虑多种频谱特征参数来分配频谱,如何实现多频谱分配的功能使得用户可以同时使用多个不连续的空闲频谱进行通信,如何实现发送端和接收端之间的握手协商以将发送端的分配结果通知接收端,还有待进一步研究。

(3)大规模、高性能的无线 Mesh 网络。目前,构建大规模、高性能 WMN 的技术问题还没有完全解决,主要体现在容量和可扩展性两个方面。容量问题是 WMN 的基础研究问题,如何对网络进行容量优化是当前一个研究重点。主要包括路由、信道分配、链路调度、拓扑规划等方面。现有的研究工作主要包括针对已部署的网络进行路由、信道分配和链路调度的优化以及没有综合考虑路由、信道分配和链路调度的拓扑规划。联合拓扑规划、路由、信道分配和链路调度,可以更好地提升网络容量,但由于问题更加复杂,如何利用优化理论来建模和求解都相当困难,需要更为深入的研究。此外,当前的研究工作还存在着实用性不高的问题,模型中存在一些理想的假设,如何提高模型的实用性也是一个值得关注的问题。当网络规模扩大时,多跳无线传输路径的增长会极大降低端到端的吞吐量;现有的 MAC、路由和传输层协议,其协议开销会大量增加网络运行的负荷,从而影响网络性能。因此,网络架构和协议的可扩展性也是 WMN 亟需解决的问题。

(4)基于云计算的移动互联网服务。移动互联网与云计算的结合越来越受到人们的关注。移动终端在计算能力上的局限性,需要云端强大的计算能力来互补。云计算平台具有海量数据存储和高性能计算能力<sup>[156]</sup>,可以为实现可运营、可管理、低成本、高效率、高扩展、灵活的移动互联网服务提供技术支撑。因此,基于云计算的移动互联网服务是未来一个重要的研究方向,有很多问题有待进一步解决:①端到云通信的优化。将终端计算迁移到云平台,既可以充分利用云平台的计算资源,又可以降低终

端的计算开销,减少终端能耗,但会给终端带来额外的通信开销,需要研究如何降低终端的通信开销,如何在计算开销和通信开销之间进行折中;②可靠性保证。无线网络中链路的不稳定性会导致数据传输失败或服务的中断,因此需要在云平台提供针对无线网络链路特点的可靠性保证机制;③面向移动终端的服务访问接口。由于移动终端计算能力有限以及无线接入网络带宽较小等因素,需要云平台提供面向移动终端的服务访问接口。

(5)智能手机的感知技术及应用。智能手机内置多种感知设备,如加速度计、电子罗盘、GPS、麦克风、摄像头等,具备了丰富的感知功能,在医疗卫生、社交网络、环境监控、交通管理等领域已有了广泛的应用<sup>[116]</sup>。研究智能手机感知的新技术,综合运用多种感知技术和拓展基于智能手机感知的应用是今后努力的方向。现有的感知模式有两种,即参与模式和机会模式。参与模式需要用户手动触发,由于受用户参与积极性的影响,感知数据的获取量得不到保证;而机会模式则根据手机上下文自动触发,但对复杂上下文的感知却是个难题。因此结合参与模式和机会模式的混合感知模式值得关注,可能会出现未来的许多应用中。此外,连续感知是当前研究的热点,在连续感知中,节能必须被考虑。因此需要限制连续感知和通信的代价,如何在保证准确性和实时性的前提下降低能耗需要进一步的研究。

(6)移动互联网安全。目前,移动互联网安全面临着一系列的挑战。①移动终端安全:需要在硬件、操作系统、软件平台和应用软件各层面给终端提供安全防护,其中恶意软件的检测和防护还待进一步研究,监控能耗、增加平台多样性和增强硬件沙盒(sandbox)<sup>[137]</sup>等方法值得关注;②接入网络安全:异构无线网络需要统一、安全的认证机制,该机制要能够屏蔽底层异构的链路层技术,承载多种认证方法以适用于不同的接入环境;由于移动终端在计算、存储能力上的限制,需要更为高效的加密算法和密钥协商机制;WLAN 由于其安全体制缺陷,还存在许多安全问题亟需解决,如虚假 AP“钓鱼”、链路攻击、信息泄露等;③应用服务安全:面向移动互联网的流量监控和信息监管机制还待更为深入的研究,特别是研究针对移动终端和接入网络特点的基于内容的非法信息识别和过滤方法;在云计算平台中,数据的所有权和管理权分离,使得数据安全和隐私保护面临更大挑战,虚拟化的云平台在隔离用户资源方面还存在漏洞,需要进一步完善。

## 参 考 文 献

- [1] Morgan Stanley. Mobile Internet Research Report, Dec. 2009
- [2] KPCB. Mobile Internet Trends Report, May, 2011
- [3] CNNIC. 27th Statistical Report on Internet Development in China, Jan. 2011(in Chinese)  
(中国互联网络信息中心. 第 27 次中国互联网络发展状况统计报告, 2011 年 1 月)
- [4] China Academy of Telecommunication Research of MIIT, Mobile Internet White Paper, May, 2011(in Chinese)  
(工业和信息化部电信研究院. 移动互联网白皮书. 2011, 5)
- [5] Weiser M. The computer for the 21st century. Scientific American, 1991, 265(3): 94-104
- [6] Oliver E. A survey of platforms for mobile networks research. ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review, 2009, 12(4): 56-63
- [7] Hall S P, Anderson E. Operating systems for mobile computing. Journal of Computing Sciences in Colleges, 2009, 25(2): 64-71
- [8] Cuervo E, Balasubramanian A, Cho D et al. MAUI: Making smartphones last longer with code offload//Proceedings of the 8th International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services (MobiSys'10). San Francisco, USA, 2010: 49-62
- [9] Das T, Mohan P, Padmanabhan V N et al. PRISM: Platform for remote sensing using smartphones//Proceedings of the 8th International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services (MobiSys'10). San Francisco, USA, 2010: 63-76
- [10] Naik K. A survey of software based energy saving methodologies for handheld wireless communication devices. Department of ECE, University of Waterloo; Technical Report Na 2010-13, 2010
- [11] Gezici S. A survey on wireless position estimation. Wireless Personal Communications, 2008, 44(3): 263-282
- [12] Krishnamoorthy S, Agrawala A. Poster: A context-aware framework for mobile applications//Proceedings of the 9th international conference on Mobile systems, applications, and services (MobiSys'11). Bethesda, Maryland, USA, 2011: 403-404
- [13] Zhang D. Web content adaptation for mobile handheld devices. Communications of the ACM, 2007, 50(2): 75-79
- [14] Adzic V, Kalva H, Furht B. A survey of multimedia content adaptation for mobile devices. Multimedia Tools and Applications, 2011, 51(1): 379-396
- [15] Weilenmann A, Juhlin O. Time to revisit mobility in mobile HCI?//Proceedings of the 13th International Conference on Human Computer Interaction with Mobile Devices and Services. Stockholm, Sweden, 2011: 717-719
- [16] Zhao X, Guo Y, Feng Q et al. A system context-aware approach for battery lifetime prediction in smart phones//Proceedings of the 2011 ACM Symposium on Applied Computing. TaiChung, Taiwan, China, 2011: 641-646
- [17] Vallerio K S, Zhong L, Jha N K. Energy-efficient graphical user interface design. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2006, 5(7): 846-859
- [18] Shih E, Bahl P, Sinclair M J. Wake on wireless: An event driven energy saving strategy for battery operated devices//Proceedings of the 8th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'02). Atlanta, USA, 2002: 160-171
- [19] Kim T, Lee J, Cha H et al. An energy-aware transmission mechanism for WiFi-based mobile devices handling upload TCP traffic. International Journal of Communication Systems, 2009, 22(5): 625-640
- [20] Benini L, Bogliolo A, De Micheli G. A survey of design techniques for system-level dynamic power management. IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, 2000, 8(3): 299-316
- [21] Min J, Cha H, Ha R. System-level integrated power management for handheld systems. Microprocessors and Microsystems, 2009, 33(3): 201-210
- [22] Rahmati A, Zhong L. Context-for-wireless: Context-sensitive energy-efficient wireless data transfer//Proceedings of the 5th International Conference on Mobile Systems, Applications and Services (MobiSys'07). San Juan, Puerto Rico, 2007: 165-178
- [23] Agarwal Y, Chandra R, Wolman A et al. Wireless wakeups revisited: Energy management for VoIP over Wi-Fi smartphones//Proceedings of the 5th International Conference on Mobile Systems, Applications and Services (MobiSys'07). San Juan, Puerto Rico, 2007: 179-191
- [24] Raghunathan V, Pering T, Want R et al. Experience with a low power wireless mobile computing platform//Proceedings of the 2004 International Symposium on Low Power Electronics and Design. Newport Beach, USA, 2004: 363-368
- [25] Jung E, Vaidya N H. Improving IEEE 802.11 power saving mechanism. Wireless Networks, 2008, 14(3): 375-391
- [26] Krashinsky R, Balakrishnan H. Minimizing energy for wireless web access with bounded slowdown//Proceedings of the 8th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'02). Atlanta, USA, 2002: 119-130
- [27] Qiao D, Shin K G. Smart power-saving mode for IEEE 802.11 wireless LANs//Proceedings of the 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM'05). Miami, USA, 2005: 1573-1583
- [28] Anastasi G, Conti M, Gregori E et al. 802.11 power-saving mode for mobile computing in Wi-Fi hotspots: Limitations, enhancements and open issues. Wireless Networks, 2008, 14(6): 745-768
- [29] Lee J, Rosenberg C, Chong E K P. Energy efficient schedulers in wireless networks: Design and optimization. Mobile Networks and Applications, 2006, 11(3): 377-389
- [30] Zhang M. Study on WLAN based indoor location estimation technology[Ph.D. dissertation]. Graduate School of Shanghai Jiaotong University, Shanghai, 2009(in Chinese)  
(张明华. 基于 WLAN 的室内定位技术研究[博士学位论文]. 上海交通大学, 上海, 2009)

- [31] Zhou Ao-Ying, Yang Bin, Jin Che-Qing, Ma Qiang. Location-based services: Architecture and progress. Chinese Journal of Computers, 2011, 34(7): 1155-1171(in Chinese) (周傲英, 杨彬, 金澈清, 马强. 基于位置的服务: 架构与进展. 计算机学报, 2011, 34(7): 1155-1171)
- [32] Enge P K. The global positioning system: Signals, measurements and performance. International Journal of Wireless Information Networks, 1994, 1(2): 83-105
- [33] Liu H, Darabi H, Banerjee P, Liu J. Survey of wireless indoor positioning techniques and systems. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, 2007, 37(6): 1067-1080
- [34] Seppanen A, Ikonen J, Porras J. Extracting and using position information in WLAN networks. Lappeenranta University of Technology, Finland, 2003
- [35] Chen Y, Chan Y, She C. Enabling location-based services in wireless LAN hotspots. International Journal of Network Management, 2005, 15(3): 163-175
- [36] Li X, Pahlavan K. Super-resolution TOA estimation with diversity for indoor geolocation. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2004, 3(1): 224-234
- [37] Li X, Pahlavan K, Latva-Aho M et al. Comparison of indoor geolocation methods in DSSS and OFDM wireless LAN systems//Proceedings of the IEEE 52nd Vehicular Technology Conference (VTC'00). Boston, USA, 2000: 3015-3020
- [38] Gunther A, Hoene C. Measuring round trip times to determine the distance between WLAN nodes//Proceedings of the 4th International IFIP Networking Conference. Waterloo, Ontario, Canada, 2005: 303-319
- [39] Pahlavan K, Li X, Makela J P. Indoor geolocation science and technology. IEEE Communications Magazine, 2002, 40(2): 112-118
- [40] Teuber A, Eissfeller B, Pany T. A two-stage fuzzy logic approach for wireless LAN indoor Positioning//Proceedings of the IEEE/ION Position, Location, and Navigation Symposium. San Diego, USA, 2006: 730-738
- [41] Niculescu D, Nath B. VOR base stations for indoor 802.11 positioning//Proceedings of the 10th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'04). Philadelphia, USA, 2004: 58-69
- [42] Bahl P, Padmanabhan V N. RADAR: An in-building RF-based user location and tracking system//Proceedings of the 19th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies(INFOCOM'00). Tel Aviv, Israel, 2000: 775-784
- [43] Battiti R, Villani A, Nhat T L. Neural network models for intelligent networks: Deriving the location from signal patterns//Proceedings of the 1st Annual Symposium on Autonomous Intelligent Networks and Systems. Los Angeles, USA, 2002
- [44] Brunato M, Battiti R. Statistical learning theory for location fingerprinting in wireless LANs. Computer Networks, 2005, 47(6): 825-845
- [45] Prasithsangaree P, Krishnamurthy P, Chrysanthi P. On indoor position location with wireless LANs//Proceedings of the 13th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. Lisboa, Portugal, 2002: 720-724
- [46] Madigan D, Einahrawy E, Martin R P et al. Bayesian indoor positioning systems//Proceedings of the 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies(INFOCOM'05). Miami, USA, 2005: 1217-1227
- [47] Kjargaard M. A taxonomy for radio location fingerprinting//Proceedings of the 3rd International Conference on Location and Context-Awareness. Oberpfaffenhofen, Germany, 2007: 139-156
- [48] Youssef M A, Agrawala A, Udaya Shankar A. WLAN location determination via clustering and probability distributions//Proceedings of the 1st IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom 2003). Dallas-Fort, USA, 2003: 143-150
- [49] Chen Y, Yang Q, Yin J et al. Power-efficient access-point selection for indoor location estimation. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 2006, 18(7): 877-888
- [50] King T, Haenselmann T, Effelsberg W. On-demand fingerprint selection for 802.11-based positioning systems//Proceedings of the 2008 International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks. Newport Beach, USA, 2008: 1-8
- [51] Jie Y, Qiang Y, Ni L M. Learning adaptive temporal radio maps for signal-strength-based location estimation. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2008, 7(7): 869-883
- [52] Safwat A M, Mouftah H. 4G network technologies for mobile telecommunications. IEEE Network, 2005, 19(5): 3-4
- [53] Jun M, Li G Y, Bing H J. Signal processing in cognitive radio. Proceedings of the IEEE, 2009, 97(5): 805-823
- [54] Gesbert D, Shafi M, Da-Shan S et al. From theory to practice: An overview of MIMO space-time coded wireless systems. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2003, 21(3): 281-302
- [55] Ariananda D D, Lakshmanan M K, Nikoo H. A survey on spectrum sensing techniques for cognitive radio//Proceedings of the 2nd International Workshop on Cognitive Radio and Advanced Spectrum Management. Aalborg, Denmark, 2009: 74-79
- [56] Akyildiz I F, Lee W, Vuran M C et al. Next generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: A survey. Computer Networks, 2006, 50(13): 2127-2159
- [57] Incel O D. A survey on multi-channel communication in wireless sensor networks. Computer Networks, 2011, 55(13): 3081-3099
- [58] Akyildiz I F, Wang X, Wang W. Wireless mesh networks: A survey. Computer Networks, 2005, 47(4): 445-487
- [59] Al-Surmi I, Othman M, Mohd Ali B. Mobility management for IP-based next generation mobile networks: Review, challenge and perspective. Journal of Network and Computer Applications, 2011(in Press)
- [60] Akyildiz I F, Won-Yeol L, Vuran M C et al. A survey on spectrum management in cognitive radio networks. IEEE Communications Magazine, 2008, 46(4): 40-48
- [61] Katz R H, Brewer E A, Amir E et al. The bay area research wireless access network (BARWAN)//Proceedings of the 41st IEEE International Computer Conference. Washington, USA, 1996: 15-20

- [62] Technical Specification Group Services and System Aspects; 3GPP System to Wireless Local Area Network (WLAN) Interworking; System Description. 3GPP TS 23.234 v6.3.0, Dec. 2004
- [63] Feasibility study on 3GPP system to wireless local area network (WLAN) interworking. 3GPP TS 22.934 v6.2.0, Sept. 2003
- [64] Broadband Radio Access Networks (BRAN); HIPERLAN Type 2; Requirements and Architectures for Interworking between HIPERLAN/2 and 3rd Generation Cellular Systems. ETSI Technical Report 101 957, Aug. 2001
- [65] Niebert N, Prytz M, Schieder A et al. Ambient networks: A framework for future wireless internetworking//Proceedings of the IEEE VTC 2005-Spring. Stockholm, Sweden, 2005; 2969-2973
- [66] Toenjes R, Benko P, Ebenhard J et al. Architecture for a future generation multi-access wireless system with dynamic spectrum allocation//Proceedings of the IST Mobile Summit. Galway, Ireland, 2000; 95-100
- [67] Identification, definition and assessment of cooperation schemes between RANs-final deliverable. WINNER D4.3 version 1.0, June 2005
- [68] Final report on the evaluation of RRM/CRRM algorithms. EVEREST IST-2002-001858, Oct. 2005
- [69] Jia Hui-Ling. Access selection and call admission control in heterogeneous wireless networks [Ph. D. dissertation]. Graduate School of Zhejiang University, Hangzhou, 2007 (in Chinese)  
(贾会玲. 异构无线网络中的接入选择与准入控制研究[博士学位论文]. 浙江大学, 杭州, 2007)
- [70] Buddhikot M, Chandranmenon G, Han S et al. Integration of 802.11 and third-generation wireless data networks//Proceedings of the 22rd Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM'03). San Francisco, USA, 2003; 503-512
- [71] Chen J, Chen W. Design and analysis of a mobility gateway for GPRS-WLAN integration. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2007, 56(5): 2603-2616
- [72] Wu G, Mizuno M, Havinga P J M. MIRAI architecture for heterogeneous network. IEEE Communications Magazine, 2002, 40(2): 126-134
- [73] Havinga P J M, Smit G J M, Wu G et al. The SMART project: Exploiting the heterogeneous mobile world//Proceedings of the 2nd International Conference on Internet Computing. Las Vegas, USA, 2001; 346-352
- [74] Akyildiz I F, Mohanty S, Jiang X. A ubiquitous mobile communication architecture for next-generation heterogeneous wireless systems. IEEE Communications Magazine, 2005, 43(6): S29-S36
- [75] Kibria M R, Jamalipour A. On designing issues of the next generation mobile network. IEEE Network, 2007, 21(1): 6-13
- [76] IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks-Part 21: Media Independent Handover. IEEE Std 802.21-2008. 2009; c1-c301
- [77] Johnson D, Perkins C et al. Mobility Support in IPv6. IETF RFC 3775, June 2004
- [78] Soliman H, Castelluccia C, El-Malki K, Bellier L. Hierarchical Mobile IPv6 Mobility Management (HMIPv6). IETF RFC 4140, Aug. 2005
- [79] Koodli G. Fast Handovers for Mobile IPv6. IETF RFC 4068, July 2005
- [80] Gundavelli S, Leung K, Devarapalli V, Chowdhury K, Patil B. Proxy Mobile IPv6 (RFC 5213). Cisco; IETF, August 2008
- [81] De La Oliva A, Banchs A, Soto I et al. An overview of IEEE 802.21: Media-independent handover services. IEEE Wireless Communications, 2008, 15(4): 96-103
- [82] Calhoun P, Hara B O, Suri R et al. Light Weight Access Point Protocol (RFC5412). Mar. 2007
- [83] Narasimhan P, Harkins D, Ponnuswamy S. SLAPP: Secure Light Access Point Protocol (RFC 5413). Mar. 2005
- [84] Singh I, Francisco P, Pakulski K et al. CAPWAP Tunneling Protocol (CTP). June 2005
- [85] Iino S, Govindan S, Sugiura M, Cheng H. Wireless LAN Control Protocol (WiCoP) (RFC 5414). July 2005
- [86] Calhoun P, Montemurro M, Stanley D. Control and Provisioning of Wireless Access Points (CAPWAP) Protocol Specification (RFC 5415). Mar. 2009
- [87] Calhoun P, Montemurro M, Stanley D. Control and Provisioning of Wireless Access Points (CAPWAP) Protocol Binding for IEEE 802.11 (RFC 5416). Mar. 2009
- [88] Bernaschi M, Cacace F, Iannello G et al. OpenCAPWAP: An open source CAPWAP implementation for the management and configuration of WiFi hot-spots. Computer Networks, 2009, 53(2): 217-230
- [89] Bernaschi M, Cacace F, Davoli A et al. A CAPWAP-based solution for frequency planning in large scale networks of WiFi Hot-Spots. Computer Communications, 2011, 34(11): 1283-1293
- [90] Lee M J, Zheng J, Ko Y et al. Emerging standards for wireless mesh technology. IEEE Wireless Communications, 2006, 13(2): 56-63
- [91] 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. IEEE P802.11s/D9.0, February 2011, 2011; p. 1-361
- [92] De Couto D S J, Aguayo D, Bicket J et al. A high-throughput path metric for multi-hop wireless routing//Proceedings of the 9th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'03). San Diego, USA, 2003; 134-146
- [93] Draves R, Padhye J, Zill B. Routing in multi-radio, multi-hop wireless mesh networks//Proceedings of the 10th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'04). Philadelphia, USA, 2004; 114-128
- [94] Hassanein H, Zhou A. Routing with load balancing in wireless Ad hoc networks//Proceedings of the 4th ACM Interna-

- tional Workshop on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems. Rome, Italy, 2001: 89-96
- [95] Lee S J, Gerla M. Dynamic load-aware routing in ad hoc networks//Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC'01). Helsinki, Finland, 2001: 3206-3210
- [96] Yang Y, Wang J, Kravets R. Designing routing metrics for mesh networks//Proceedings of the 1st IEEE Workshop on Wireless Mesh Networks. Santa Clara, USA, 2005
- [97] Jones E P C, Karsten M, Ward P A S. Multipath load balancing in multi-hop wireless networks//Proceedings of the IEEE International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications. Montreal, Canada, 2005: 158-166
- [98] Marina M K, Das S R. Ad hoc on-demand multipath distance vector routing. ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review, 2002, 6(3): 92-93
- [99] Bahl P, Adya A, Padhye J et al. Reconsidering wireless systems with multiple radios. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2004, 34(5): 39-46
- [100] Kyasanur P, Vaidya N H. Capacity of multi-channel wireless networks: Impact of number of channels and interfaces//Proceedings of the 11th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom). Cologne, Germany, 2005: 43-57
- [101] Raniwala A, Gopalan K, Chiueh T. Centralized channel assignment and routing algorithms for multi-channel wireless mesh networks. ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review, 2004, 8(2): 50-65
- [102] Ramachandran K N, Belding E M, Almeroth K C et al. Interference-aware channel assignment in multi-radio wireless mesh networks//Proceedings of the 25th IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM'06). Barcelona, Spain, 2006: 1-12
- [103] Wu S L, Lin C Y, Tseng Y C et al. A new multi-channel MAC protocol with on-demand channel assignment for multi-hop mobile ad hoc networks//Proceedings of the International Symposium on Parallel Architectures, Algorithms and Networks. Los Alamitos, USA, 2000: 232-237
- [104] Kyasanur P, Vaidya N H. Routing and interface assignment in multi-channel multi-interface wireless networks//Proceedings of the 2005 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). Piscataway, USA, 2005: 2051-2056
- [105] Alicherry M, Bhatia R, Li L. Joint channel assignment and routing for throughput optimization in multi-radio wireless mesh networks//Proceedings of the 11th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'05). Cologne, Germany, 2005: 58-72
- [106] Mohsenian-Rad A H, Wong V W S. Joint logical topology design, interface assignment, channel allocation, and routing for multi-channel wireless mesh networks. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2007, 6(12): 4432-4440
- [107] Gardellin V, Das S K, Lenzini L et al. G-PaMeLA: A divide-and-conquer approach for joint channel assignment and routing in multi-radio multi-channel wireless mesh networks. Journal of Parallel and Distributed Computing, 2011, 71(3): 381-396
- [108] Srinivas A, Zussman G, Modiano E. Mobile backbone networks-construction and maintenance//Proceedings of the 7th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc'06). Florence, Italy, 2006: 166-177
- [109] Robinson J, Singh M, Swaminathan R et al. Deploying mesh nodes under non-uniform propagation//Proceedings of the 29th IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM'10). San Diego, United States, 2010: 2142-2150
- [110] Bejerano Y. Efficient integration of multihop wireless and wired networks with QoS constraints. IEEE/ACM Transactions on Networking (TON), 2004, 12(6): 1064-1078
- [111] Drabu Y, Peyravi H. Gateway placement with QoS constraints in wireless mesh networks//Proceedings of the 7th International Conference on Networking (ICN'08). Cancun, Mexico, 2008: 46-51
- [112] Tsai F S, Etoh M, Xie X et al. Introduction to mobile information retrieval. IEEE Intelligent Systems, 2010, 25(1): 11-15
- [113] Yao-Jen C, Hung-Huan L, Li-Der C et al. A general architecture of mobile social network services//Proceedings of the 2007 International Conference on Convergence Information Technology. Gyeongju, Korea, 2007: 151-156
- [114] Varshney U, Vetter R. Mobile commerce: Framework, applications and networking support. Mobile Networks and Applications, 2002, 7(3): 185-198
- [115] Kumar K, Yung-Hsiang L. Cloud computing for mobile users: Can offloading computation save energy? Computer, 2010, 43(4): 51-56
- [116] Lane N D, Miluzzo E, Hong L et al. A survey of mobile phone sensing. IEEE Communications Magazine, 2010, 48(9): 140-150
- [117] Qin C, Bao X, Choudhury R R et al. TagSense: A smartphone-based approach to automatic image tagging//Proceedings of the 9th International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services (MobiSys'11). Bethesda, USA, 2011: 1-14
- [118] Kamvar M, Baluja S. The role of context in query input: Using contextual signals to complete queries on mobile devices//Proceedings of the 9th International Conference on Human Computer Interaction with Mobile Devices and Services. Singapore, 2007: 405-412
- [119] Jones S, Jones M, Deo S. Using keyphrases as search result surrogates on small screen devices. Personal Ubiquitous Computing, 2004, 8(1): 55-68
- [120] Karlson A K, Robertson G G, Robbins D C et al. FaThumb: A facet-based interface for mobile search//Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems. Montreal, Quebec, Canada, 2006: 711-720
- [121] Pretschner A, Gauch S. Ontology based personalized search//Proceedings of the 11th IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence. Chicago, USA, 1999: 391-398

- [122] Jones G J F, Brown P J. Context-aware retrieval for ubiquitous computing environments//Proceedings of the 2003 International Workshop on Mobile and Ubiquitous Information Access. Udine, Italy, 2003; 227-243
- [123] Coppola P, Mea V D, Gaspero L D et al. The context-aware browser. *IEEE Intelligent Systems*, 2010, 25(1): 38-47
- [124] Yan B, Chen G. AppJoy: Personalized mobile application discovery//Proceedings of the 9th International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services (MobiSys'11). Bethesda, USA, 2011
- [125] Wikipedia, <http://en.wikipedia.org/wiki>
- [126] Wang Yu-Xiang, Qiao Xiu-Quan, Li Xiao-Feng, Meng Luo-Ming. Research on context-awareness mobile SNS service selection mechanism. *Chinese Journal of Computers*, 2010, 33(11): 2126-2135(in Chinese)  
(王玉祥, 乔秀全, 李晓峰, 孟洛明. 上下文感知的移动社交网络服务选择机制研究. *计算机学报*, 2010, 33(11): 2126-2135)
- [127] Adams B, Phung D, Venkatesh S. Sensing and using social context. *ACM Transactions on Multimedia Computing, Communications and Applications*, 2008, 5(2): 1-27
- [128] Eagle N, Pentland A. Social serendipity: Mobilizing social software. *IEEE Pervasive Computing*, 2005, 4(2): 28-34
- [129] Li K A, Sohn T Y, Huang S et al. Peopletones: A system for the detection and notification of buddy proximity on mobile phones//Proceedings of the 6th International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services (MobiSys'08). Breckenridge, USA, 2008; 160-173
- [130] Gaonkar S, Li J, Choudhury R R et al. Micro-Blog: Sharing and querying content through mobile phones and social participation//Proceedings of the 6th International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services (MobiSys'08). Breckenridge, USA, 2008; 174-186
- [131] Motani M, Srinivasan V, Nuggehalli P S. PeopleNet: Engineering a wireless virtual social network//Proceedings of the 11th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'05). Cologne, Germany, 2005; 243-257
- [132] Yang Z, Zhang B, Dai J et al. E-SmallTalker: A distributed mobile system for social networking in physical proximity//Proceedings of the IEEE 30th International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS'10). Genoa, Italy, 2010; 468-477
- [133] Becher M, Freiling F C, Hoffmann J et al. Mobile security catching up? Revealing the nuts and bolts of the security of mobile devices//Proceedings of the IEEE Symposium on Security and Privacy (SP'11). Oakland, USA, 2011
- [134] Yi P, Wu Y, Zou F et al. A survey on security in wireless mesh networks. *IETE Technical Review*, 2010, 27(1): 6-14
- [135] Kandukuri B R, Paturi V R, Rakshit A. Cloud security issues//Proceedings of the IEEE International Conference on Services Computing. Bangalore, USA, 2009; 517-520
- [136] Krumm J. A survey of computational location privacy. *Personal and Ubiquitous Computing*, 2009, 13(6): 391-399
- [137] Yan Q, Li Y, Li T, Deng R. Insights into malware detection and prevention on mobile phone. *Security Technology*, 2009, 58: 242-249
- [138] Bose A, Hu X, Shin K G et al. Behavioral detection of malware on mobile handsets//Proceedings of the 6th International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services (MobiSys'08). Breckenridge, USA, 2008; 225-238
- [139] Enck W, Ongtang M, McDaniel P. On lightweight mobile phone application certification//Proceedings of the 16th ACM Conference on Computer and Communications Security (CCS'09). Chicago, USA, 2009; 235-245
- [140] Kim H, Smith J, Shin K G. Detecting energy-greedy anomalies and mobile malware variants//Proceedings of the 6th International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services (MobiSys'08). Breckenridge, USA, 2008; 239-252
- [141] Cheng J, Wong S H Y, Yang H et al. SmartSiren: Virus detection and alert for smartphones//Proceedings of the 5th International Conference on Mobile Systems, Applications and Services (MobiSys'07). San Juan, Puerto Rico, 2007; 258-271
- [142] Bickford J, Lagar-Cavilla H A, Varshavsky A. Security versus energy tradeoffs in host-based mobile malware detection//Proceedings of the 9th International Conference on Mobile Systems, Applications and Services (MobiSys'11). Bethesda, USA, 2011
- [143] Kaasinen E. User needs for location-aware mobile services. *Personal and Ubiquitous Computing*, 2003, 7(1): 70-79
- [144] Lei Y, Quintero A, Pierre S. Mobile services access and payment through reusable tickets. *Computer Communications*, 2009, 32(4): 602-610
- [145] Sweeney L. K-anonymity: A model for protecting privacy. *International Journal on Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems*, 2002, 10(5): 557-570
- [146] Gruteser M, Grunwald D. Anonymous usage of location-based services through spatial and temporal cloaking//Proceedings of the 1st International Conference on Mobile Systems, Applications and Services (MobiSys'03). San Francisco, USA, 2003; 31-42
- [147] Kido H, Yanagisawa Y, Satoh T. Protection of location privacy using dummies for location-based services//Proceedings of the 21st International Conference on Data Engineering Workshops. Tokyo, Japan, 2005; 1248-1252
- [148] Khoshgozaran A, Shahabi C. Blind evaluation of nearest neighbor queries using space transformation to preserve location privacy//Proceedings of the 10th International Conference on Advances in Spatial and Temporal Databases. Boston, USA, 2007; 239-257
- [149] Hu H, Lee D L. Range nearest-neighbor query. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 2006, 18(1): 78-91
- [150] Pan Xiao, Hao Xing, Meng Xiao-Feng. Privacy preserving towards continuous query in location-based services. *Journal of Computer Research and Development*, 2010, 47(1): 121-129(in Chinese)

(潘晓, 郝兴, 孟小峰. 基于位置服务中的连续查询隐私保护研究. 计算机研究与发展, 2010, 47(1): 121-129)

- [151] Wu W, Luo J, Yang M. Cost-effective placement of mesh nodes in wireless mesh networks//Proceedings of the 5th International Conference on Pervasive Computing and Applications. Maribor, Slovenia, 2010
- [152] Wu W, Luo J, Yang M. Gateway placement optimization for load balancing in wireless mesh networks//Proceedings of the 13th International Conference on CSCW in Design. Santiago, Chile, 2009: 408-413
- [153] Luo J, Wu W, Yang M. Interference-aware gateway placement for wireless mesh networks with fault tolerance assurance//Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on System, Man, and Cybernetics. Istanbul, Turkey,

2010: 2373-2380

- [154] Wang W, Luo J, Yang M, Wu W. MT3-DA: Multicast optimization mechanism based on transmission time and interference minimization in wireless mesh networks//Proceedings of the 2010 9th International Conference on Grid and Cloud Computing. Nanjing, China, 2010: 344-349
- [155] Lin K, Kansal A, Lymberopoulos D et al. Energy-accuracy trade-off for continuous mobile device location//Proceedings of the 8th International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services (MobiSys'10). San Francisco, California, USA, 2010: 285-298
- [156] Armbrust M, Fox A, Griffith R et al. Above the clouds: A Berkeley view of cloud computing. EECS Department, University of California, Berkeley, 2009



**LUO Jun-Zhou**, born in 1960, Ph.D., professor, Ph. D. supervisor. His research interests include next-generation network architecture, protocol engineering, network security, grid and cloud computing, and wireless local area network.

**WU Wen-Jia**, born in 1983, Ph. D. candidate. His research interests focus on wireless networks.

**YANG Ming**, born in 1979, Ph. D., lecturer. His research interests include network security and wireless networks.

## Background

This work is supported by the National Basic Research Program ( 973 Program ) of China under Grant No. 2010CB328104, National Natural Science Foundation of China under Grants No. 60903161, No. 60903162, No. 61003257, No. 61070161 and No. 61070158, China Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education under Grant No. 200802860031, Jiangsu Provincial Natural Science Foundation of China under Grant No. BK2008030, Jiangsu Provincial Key Laboratory of Network and Information Security under Grant No. BM2003201, and Key Laboratory of Computer Network and Information Integration of Ministry of Education of China under Grant No. 93K-9.

As the rapid development of technologies for wireless broadband access and mobile devices, the Mobile Internet be-

comes an emerging technology and expects to grow up in an accelerated pace. In recent years, a great number of researchers have paid much attention to the area of Mobile Internet, and have focused on some issues from the mobile devices, access networks, services and security and privacy protection. In the past years, the authors also have achieved some research results in this area, and these works mainly focus on the test-bed of WLAN base station and performance optimization of wireless mesh networks. However, a lot of issues in this area still have not been addressed well, and many new challenges have been raised. Therefore, the authors conduct a survey on research progresses of the Mobile Internet on four aspects, namely mobile devices, access networks, services and security and privacy protection, and provide a summary for future research issues.