软件学报 ISSN 1000-9825, CODEN RUXUEW
Journal of Software,2015,26(4):927−944 [doi: 10.13328/j.cnki.jos.004812]
©中国科学院软件研究所版权所有.
E-mail: jos@iscas.ac.cn
http://www.jos.org.cn
Tel: +86-10-62562563

宽带无线网络中的频谱资源管理综述*

孙文琦[1,2], 吴建平[1,2], 李贺武[1,2]

[1](清华大学 网络科学与网络空间研究院,北京 100084)

[2](清华大学 信息科学与技术国家实验室(筹),北京 100084)

通讯作者: 李贺武, E-mail: lihewu@cernet.edu.cn

摘 要: 在宽带无线网络中,频谱是重要但很稀缺的资源.随着无线网络规模的迅速增长,有限的频谱资源已无法满足日益增长的移动流量.为缓解网络压力、提高频谱资源的利用效率,频谱资源管理机制得到了广泛的关注.首先简述无线通信中频谱资源的基本知识,并分析频谱使用所面临的主要挑战;然后,从传统的静态频谱管理和正在成为主流的动态频谱管理两个方面对宽带无线网络中的频谱资源管理研究进行分类总结和分析评价;最后,从管理架构和关键要素两个层面对频谱资源管理未来研究的发展趋势进行了展望.

关键词: 宽带无线网络;频谱;资源利用率;静态管理;动态管理

中图法分类号: TP393

中文引用格式: 孙文琦,吴建平,李贺武.宽带无线网络中的频谱资源管理综述.软件学报,2015,26(4):927−944. http://www.jos.org.cn/1000-9825/4812.htm

英文引用格式: Sun WQ, Wu JP, Li HW. Survey on spectrum management in broadband wireless networks. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2015,26(4):927−944 (in Chinese). http://www.jos.org.cn/1000-9825/4812.htm

Survey on Spectrum Management in Broadband Wireless Networks

SUN Wen-Qi[1,2], WU Jian-Ping[1,2], LI He-Wu[1,2]

[1](Institute for Network Sciences and Cyberspace, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

[2](Tsinghua National Laboratory for Information Science and Technology (TNLIST), Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Radio spectrum is the basic and essential resource in broadband wireless networks, however it is quite scarce. With the growing scale of wireless network, the limited spectrum resource cannot meet the demand of exploding mobile traffic. To alleviate burden of networks and improve resource utilization, much efforts have been devoted to efficient mechanisms of spectrum management. This paper first summarizes the fundamental knowledge of spectrum in wireless communications and the challenges faced by spectrum utilization. It then categorizes and evaluates the existing spectrum resource management methods in broadband wireless networks from the aspects of traditional static management and prevalent dynamic management. Finally, it offers a prospect of future research development concerning frameworks and key issues towards dynamic spectrum management.

Key words: broadband wireless network; spectrum; resource utilization; static management; dynamic management

近年来,随着智能终端的大规模流行,移动网络流量急剧增长,这给原本就稀缺的无线频谱资源带来了更大的压力.运营商为缓解网络压力,大规模地部署网络基础设施,如基站、无线接入点(AP)等.然而,密集的网络设备除了仍难满足巨大的流量需求外,还可能造成严重的信道干扰.为增加频谱资源的供给,传统的被分配给模拟电视和无线麦克使用的频段(“白空间”)在美国等国家首先被开放出来.在异构网络共存、密集覆盖的场景下,如何管理传统的开放 ISM 频谱以及新开放的“白空间”频谱,提高频谱资源利用率、降低干扰、优化网络性能,是当前宽带无线网络中亟待解决的问题.

* 基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)(2014AA01A701); “核高基”国家科技重大专项(2012ZX01039003)
收稿时间: 2014-05-04; 修改时间: 2014-06-20; 定稿时间: 2015-01-01

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

图 1 给出了主要的宽带无线网络协议标准.传统上,不同的宽带无线网络有各自的工作频段,在该频段上采用偏静态的频谱管理方式.以 802.11 无线局域网(WLAN)为例,一段频谱被划分为若干个固定宽度的信道,频谱管理的主要目标即:为网络内的所有 AP 分配信道.静态频谱管理相对简单且易于理解,但却缺乏动态性和灵活性,难以满足激增且动态变化的流量需求,且容易造成资源浪费.相比较静态频谱的使用,动态频谱的使用一般是指设备所使用的频宽、中心频率等参数在传输过程中能够被动态地调整.为了提高资源利用率,各网络中的频谱管理已具有一定程度的动态性,如划分不同宽度的信道;而“白空间”频段的开放,使得动态频谱管理成为了研究的主流和未来频谱使用的发展趋势.“白空间”在提供更多频谱资源的同时,也对频谱管理的动态性提出了更高的要求.这是因为利用“白空间”频段进行无线通信,必须动态避让“主用户”(TV、麦克等).此外,“白空间”频段允许被异构网络(如图 1 中的多种网络所示)共享.因此,高效的动态频谱管理不可或缺.

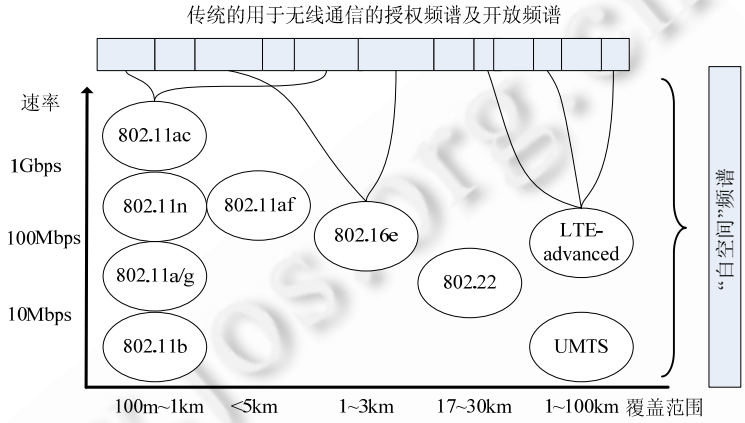

Fig.1 Standards of broadband wireless networks

图 1 宽带无线网络相关标准

本文按照宽带无线网络中频谱资源管理发展的趋势,即,静态管理到动态管理的转变,对相关研究进行了分析和评述,希望能为该领域的研究者提供一些有益的启示.需要说明的是:在静态管理方面,本文以 WLAN 网络中的频谱管理作为典型对象进行分析;在动态管理方面,本文主要以使用“白空间”频段的网络为研究对象,可能涉及到异构网络的场景,本文主要关注如何动态利用“白空间”频谱资源,而 802.16 网络以及蜂窝网内部的频谱管理机制,有系列标准对其进行定义,本文并不展开讨论.

本文第 1 节介绍有关无线频谱的基础知识.第 2 节分析宽带无线网络频谱管理面临的主要挑战.第 3 节以 WLAN 为例,介绍传统的静态频谱管理方法及其存在的不足之处.第 4 节从管理架构和关键要素两个方面对动态频谱管理方法进行阐述.第 5 节对频谱管理未来的研究发展趋势进行思考和展望.

1 无线网络频谱资源概述

在无线传输中,无线电波工作的频段(一般为 3kHz~300GHz)统称为无线电的频谱.频谱被划分为不同的射频频段(radio frequencies),包括授权频段和非授权频段.作为一种重要而稀缺的资源,各频段的使用场景已基本被规定完毕.授权频段通常由政府机构掌控并分配给持有使用权的机构或服务,如移动通信运营商、雷达、无线电广播等.非授权的频段为开放频段,不需要授权即可在一定功率内使用,如无线局域网、蓝牙、微波炉等均工作在非授权频段.IEEE 802.11 无线局域网目前主要使用两个非授权频段:2.4GHz 的工业、科研、医疗(ISM)频段及 5GHz 的非授权国家信息基础设施(U-NII)频段[1,2].

无线网络的带宽与传输所用的频谱宽度直接相关,频谱资源的受限导致了带宽增长受限.当前,无线带宽难以应对激增的移动数据流量需求[3],运营商普遍采用增加网络设施(如基站及接入点等)缩小频谱的共享范围,从而承载更多的数据流量.然而,这种方式仍然难以满足迅速增长的流量需求,还可能带来严重的干扰以及巨大的

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

能耗问题[4].因此,能否通过机会地利用和使用新的频段来进一步提高无线带宽,成为备受关注的热点.美国联邦通信委员会(FCC)的报告[5,6]表明:授权频谱的使用具有时域和空域动态性,频谱利用率差异大,从 15%~85%不等,低于 1GHz 的很多频段大部分时间是空闲的.在欧洲的部分国家也有相关测量结果.这些结论均显示,很多授权频段并没有被充分利用,因此,工业界和学术界开始关注机会地使用一些授权频段进行无线传输.2008 年,FCC 批准了“白空间”计划,即,开放境内曾经分配给模拟电视及无线麦克风的授权频段.这些频段可以用于无线通信,但需避让传统的授权用户,也称为主用户(TV、无线麦克等)[7].

“白空间”频段的开放,为无线通信提供了更多的可用频谱.截止到目前,FCC 共开放了 30 个 6MHz 宽的信道,未来还有可能开放更多可用频谱.然而,相对于日益增长的网络流量,当前的频谱资源仍非常有限.因此,提高资源的利用率成为增加有效频谱带宽的要素,而频谱的动态使用则是提高利用率的关键.此外,“白空间”频段的特性本身就要求非授权用户机会地、动态地使用,从而能够避让主用户.这首先需要物理层足够灵活,能够支持动态频谱使用.目前较为公认的能够利用“白空间”频段进行通信的物理层技术为软件定义无线电(SDR)[8],SDR 被认为是未来无线网络的主流物理层技术,其主要目标是:通过软件动态地调整硬件参数,使得物理层甚至 MAC 层具有可编程的特性.软件定义无线电的终端具有动态切换通信频段的能力,但这并不意味着网络里的终端能够高效地共享频谱资源.因此,如何将软件定义无线电的设备组织起来,合理规划和动态共享频谱资源,提高网络资源利用率,是当前研究的重点与难点.

2 宽带无线网络频谱使用面临的挑战

在软件定义无线出现之前,无线网络中的频谱使用基本上采用静态的方式,静态方式容易带来效率低下、资源浪费等问题.动态频谱管理可灵活地调整更多的参数来适应网络的动态特性,如针对每个终端、每条流来调整通信频宽、中心频率等,但可调整的参数与网络内多种动态因素之间的合理匹配具有很大的难度.另外,无论是传统的静态频谱管理还是动态频谱管理,为了追求更合理的资源分配方案,往往会造成计算和执行复杂度过高,影响网络流量的实时性.本节就网络动态特性以及实时性约束等给无线网络频谱使用带来的挑战进行简要的阐述.

2.1 网络动态特性与频谱管理

2.1.1 流量的动态性

受到终端移动的影响,宽带无线网络内的流量具有较强的动态性.智能终端的爆炸式增长,不仅使得数据流量激增,也增强了用户的移动特性.因此在无线网络中,流量分布不均以及随时间动态变化的情况愈加明显.

流量的动态性对更加灵活的频谱分配提出了需求,以 WLAN 中的场景为例,我们来对比静态与动态频谱分配对网络需求的适应能力.如图 2 所示:距离较近的几个 AP 承载的用户数量不等,按传统的静态信道分配方式,每个 AP 工作在一个 20MHz 宽的信道上,因此,多个用户共享 AP1 上的 20MHz 信道,AP1 不能为用户提供更高的带宽;而 AP2 和 AP3 因为用户较少,信道空闲,造成带宽资源的浪费.

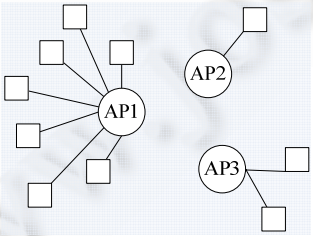

Fig.2 Adjacent APs with uneven load

图 2 相邻 AP 负载不均

这样的场景在无线网络中普遍存在.如果采用动态频谱分配的方式,信道宽度不仅可以被划分得更小,并且

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

可以按需进行绑定和分配,这样就可以缩减负载低的 AP2 和 AP3 所使用的频谱,并将其动态调拨给 AP1 使用,既避免资源的浪费,又提高了大部分终端的传输性能.当负载分布发生变化时,频谱的划分也可以随之调整.在 WLAN 所使用的频段中,2.4GHz 频段动态调整的空间有限,而 5GHz 上有较大的调整空间.802.11n 协议在 5GHz 上的信道绑定机制就可以被视为一个初步的改进,但是粒度较粗,仅支持 20MHz~40MHz 的变化,动态性仍然不足.在使用“白空间”频段的网络中,频谱使用具有更强的灵活性,与动态流量需求之间的耦合也更为紧密,使得频谱的动态使用更具挑战性.

2.1.2 应用的动态性

不同的终端,或同一终端运行的不同应用,对网络服务质量的需求不同.对应于频谱分配而言:高带宽应用适合使用较宽的频段;而带宽要求不高、延迟敏感型应用,如 VoIP 等,则基本不需要考虑频谱宽度,更适合使用干扰少、竞争少的频段.为终端动态地选择最适合的频段接入,不仅能够提高应用体验,还可以最大程度地利用频谱资源.然而,由于终端应用种类各异,动态地为应用分配频谱资源将面临重要的挑战.

2.1.3 干扰的动态性

在无线网络中,通信频段通常被分为不同的信道,处于干扰范围的两个电信号在同一信道上传输将产生同频干扰,在相邻信道上传输会发生邻频串扰.由于信号在发射频段之外的频率上也有功率,因此如果发送功率设定较大,即便是在两个完全不重叠的信道上传输的信号也会相互干扰.

网络内的干扰分布是随负载动态变化的,即使几个通信设备使用相同信道且在彼此的干扰范围之内,但是由于传输负载较小,因此干扰未必严重.在动态频谱管理中,由于通信频段的信号传播距离、频宽、中心频率均可能发生变化,使得干扰的衡量和优化更加复杂,干扰的动态性为动态频谱带来了重要挑战.

2.2 实时性约束与频谱管理

静态的频谱管理一般对 AP 所使用的信道进行初始分配,之后,通过检测网络的干扰情况重新调整.但是要从全局的角度优化干扰,需要获取网络内大量实时信息进行计算,很多复杂的管理方法均由于复杂度、实时性的约束而停留于理论研究的阶段,网络设备实际采用的往往是简单的自适应调整机制.然而,这种简单机制为规避复杂度牺牲了一定的性能.动态频谱管理希望通过提高灵活度来提高网络性能、改善用户体验,但其动态性决定了更高的复杂度.因为动态频谱管理涉及到实时监测信道环境和通信节点信息、动态计算并分配资源以及对通信节点进行协调等,这样不仅引入新的通信开销,还可能带来较长的通信等待时间,不能满足实时性要求.因此,合理的动态频谱管理框架、快速的频谱感知、高效的计算方法、轻量级通信协议等均是近年来该领域的研究热点.

3 静态频谱资源管理方法

本节以 WLAN 为例,简要介绍静态频谱管理方法,并指出这类方法存在的缺点.在 WLAN 中,频谱资源被划分成固定宽度的信道,静态频谱管理的过程即为网络内的 AP 分配一个信道,AP 承载的终端均使用该信道的全部频谱进行通信.由于非重叠信道有限,开放的 ISM 频段受到越来越多的干扰,密集部署的网络中的干扰愈加严重.相关研究基本上围绕在如何为 AP 分配信道上,从而达到降低干扰、优化性能的目标.

较早期的研究将 AP 的部署与信道规划作为一个整体过程来计算[9−11],这类研究一般要求已知用户的流量及位置分布.然而在实际的网络中,用户的行为是动态变化、难以预测的,因此,这样的方法并不适用于规模稍大的无线网络.大部分信道规划的研究是针对一个已部署好的网络,设计信道分配方案.相关研究大致可分为分布式局部优化和集中式系统优化两种.

3.1 分布式信道规划

分布式的局部优化是指:AP 通过获取周围环境信道使用情况,并结合负载情况,选择对自身有利的信道.文献[12]首先对重叠信道之间的干扰建模,衡量任意两个信道 i,j 之间的干扰 I_{ij},AP 分布式地选择信道 i,使得对于所有邻居 AP 所使用的信道 j,I_{ij} 最小.文献[13]提出的优化目标虽然是减少全局的干扰量,但算法仍然是分布式

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

地执行,实际上与文献[12]的效果类似.LCCS[14]是曾被一主流厂商的AP所采用的一种简单信道选择机制,当AP监听到的处于相同信道的其他 AP 与客户端传输数据量超过阈值时,就开始自动扫瞄其他信道,以寻找干扰负载轻的信道.分布式信道自动配置的优势在于执行过程简单,不需要集中的计算与分配;缺陷是不能从整体上优化网络的干扰.一个 AP 选择局部最优的策略,有可能对周围 AP 产生影响,网络内的 AP 可能互相影响、反复配置,难以保证收敛性.

3.2 集中式信道规划

考虑到分布式分配方案存在的问题,部分研究采用集中式的全局优化方法.当今主流的瘦 AP 无线网络架构存在集中的无线控制器,能够采集各个 AP 上的信息,集中计算并下发配置.Mahonen 等人[15]将信道的划分归为图论中的顶点染色问题,AP 与 AP 之间的干扰被抽象成一张干扰图 $G(V,E)$,图中的顶点集 V 为全部 AP 的集合,若两个 AP 被划分相同信道就会产生干扰,那么这两个 AP 之间存在一条边,全部边的集合为 E.可以使用的颜色集合为 C,C 中包含可用信道,那么信道分配问题则可以抽象为使用 C 集合中的颜色对图 G 中的顶点的染色问题.图的染色问题并没有多项式时间的算法来求解,Mahonen 等人采用了饱和度染色的启发式算法来求得近似解.Mishra 等人[16]在文献[15]的基础上,将信道分配形式化为带权的顶点染色问题.这是因为在 2.4G 频段上只有 3 个非重叠信道,当一个图是 4 染色图但不是 3 染色图时,则存在多种方法使用 3 种颜色对该图进行不完全染色,但是这些方法都必将产生一些冲突边.因此就需要有一些限制,选择最有利的染法.Mishra 等人设计了边的权值,用以说明如果边上相应的两个 AP 被染成相同颜色时互相干扰的程度.用两个 AP 交叠区域的用户数量作为两个 AP 边上的权值,即,将两个 AP 若使用相同信道受到干扰影响的用户数作为权值.文献[17]对网络中终端受到的干扰进行建模,针对终端定义了冲突集(conflict set),一个终端的冲突集包括两个部分:r_c 和 i_c.r_c 为终端可以监听到的处于相同信道的 AP;i_c 包含该终端虽然无法直接监听到的一些 AP,但是这些 AP 与其他客户端的通信影响到该终端.在定义冲突集的基础上,文献[17]的优化目标为:为网络中的 AP 分配信道,使得冲突集为空的终端数量最多.集中式的信道分配算法虽然能从整体的角度对网络进行优化,但大部分还需要获取网络中所有 AP 和终端的实时信息.由于存在用户移动频繁、信号突变大、信息难于同步收集等因素,这些方法很难在大规模实际网络中部署.部分不需要过多信息的集中式算法,如文献[15]的基于饱和度的图染色算法,在规模较大的复杂网络中并不能获得较好的分配效果.

综上分析可知:分布式的计算方法无法给出全局的优化方案;而集中式的计算方法虽然高效,但是复杂度高.事实上,由于无线信号的传播特性,干扰往往存在于某一特定区域,即信号传播范围之内,因此可以将整个网络合理地划分为子区域,采用分而治之的思想降低全局信道分配所需的信息量,在子区域内和区域之间进行干扰的优化,以局部最优的方式逼近全局最优.如文献[18]中提出的 local-coord 算法,一个 AP 从信道 k 切换到信道 k'的条件为:考虑该 AP 所处的 *cell* 及 AP 所能影响到的使用 k 信道或者 k'信道的所有 *cell*,这些 *cell* 总的干扰值有所降低.可以看到,local-coord 是一种将整体干扰划分开来看的分区域的解法.

本节主要介绍了静态频谱管理的相关研究,表 1 对该部分内容进行了对比和总结.

Table 1 Method of static spectrum management

表 1 静态频谱管理方法总结

特点 / 研究	管理结构	优化目标	优势	缺陷
文献[12,13]	分布式	为本地 AP 选择冲突最小的信道	AP 自动配置信道,执行简单;不需要集中数据采集、计算与控制	局部优化可能引起震荡,不能从全局优化干扰
文献[14]	分布式	在存在信道冲突的情况下,选择总负载最轻的信道		
文献[15,16]	集中式	优化全局信道冲突	从全局优化干扰,提高系统资源利用率	收集全局信息、集中计算带来开销
文献[17]	集中式	最小化网络中受到干扰的终端数量		
文献[18]	区域集中式	不牺牲区域内 AP 的条件下减少本地 AP 干扰	子区域内优化,降低开销	区域间存在相互影响,子区域各自优化,可能非全局最优

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

3.3 静态频谱管理方法的缺陷

传统的静态频谱管理也具有一定的动态性,如:在分布式信道分配过程中,AP 根据负载及周围的网络状态来自动配置信道;在全局信道分配过程中,根据全局的流量、AP 位置、终端分布等,动态调整网络信道分配方案,以获取更好的网络性能.但是传统的静态频谱管理在频谱的使用上仍然是粗粒度、缺乏灵活性的.无线网络流量具有较强的动态性,同一时刻分布在网络中的负载并不均衡,传统的静态频谱管理方法无法适应这种动态特性,将导致部分 AP 由于负载过大而性能变差,而周围一些 AP 上信道空闲,不能被充分利用.此外,Tan 等人[19]指出:终端在 CSMA/CA 竞争阶段中成功后,将独占一个 20MHz 的信道,流量小的终端独占信道将造成资源的浪费.在资源远无法满足需求的今天,静态的频谱资源管理因其动态性差而不再适用,而灵活地、按需地管理频谱已经成为当前研究的热点及未来研究的主流趋势.

4 动态频谱管理研究

动态频谱管理与传统的固定宽度信道使用相对应,主要是指能够将频谱按需地、动态地分配给网络内的用户使用,频谱的宽度、中心频率等参数均可以被动态地、按需地设置.在“白空间”频段开放之前,就有动态频谱管理的需求和少量研究.但是由于频段较窄,可调整的空间不大,干扰严重,所以在“白空间”开放后,动态频谱资源管理才引起了较大的关注.近年来,认知无线电的概念就是为利用“白空间”频段提出的,它涉及到多个方面的技术,包括频谱感知、频谱共享、频谱切换和频谱决策等[20].文献[21]对认知无线电中的频谱分配进行了综述,本文不局限于单一网络,而是针对传统的开放 ISM 频段以及未来的“白空间”频段,分析从静态管理方法到动态管理方法的演变,并展望未来的发展趋势.管理架构的设计、算法和机制中需要考虑的关键要素,是实现动态频谱管理的基础,本节从以上两个方面对已有动态频谱管理研究进行分类总结和分析评述.图 3 为相关文献的具体分类,部分文献涉及几个方面的内容,因此在图 3 中重复出现.

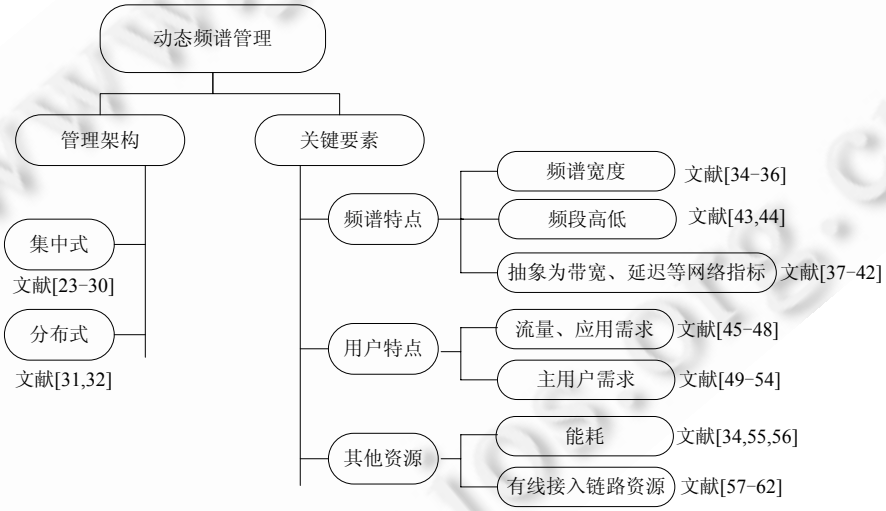

Fig.3 Categories of dynamic spectrum management schemes

图 3 动态频谱管理研究分类

4.1 频谱管理的架构

传统的静态频谱管理功能简单,基本不需要设计专用的网络单元及通信协议.动态频谱管理则是非常复杂的,需依赖于管理架构或一系列通信机制来管控和决策大量终端在不同的时间使用哪一段频谱,中心频率、频宽如何设置.因此,动态频谱管理的研究中有较多的内容关注于管理架构的设计.动态频谱管理架构可分为两种路线:分布式的协调与集中式的管控.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

集中式管理即存在一个频谱决策单元,收集全局网络信息并为网络中的节点分配频谱资源;分布式管理即网络中不存在协调单元,终端获取周围网络信息,并分布式地进行频谱竞争.一般集中式的频谱管理由于需要引入基础设施作为频谱中介,也称为有基础设施的(infrastructure-based)结构,而分布式的频谱管理相对应地称为无基础设施(infrastructure-free)的结构.分布式的管理使得终端能够独立地、机会地使用频谱资源,是最为灵活的结构,但是网络的可管可控性差,难以从系统的角度提高网络性能.集中式的管理属于灵活性较为适中的方式,其缺陷包括需要引入专门的管理单元,并设计相应的通信协议.此外,集中管控的计算复杂度和执行复杂度都要比分布式的结构要高,容易影响实时性.

频谱管理的架构和机制在保证高效的同时也要尽量降低复杂度,各种架构设计均有其优势和缺陷,目前仍没有较为通用的频谱管理架构.关于几种管理结构特点的对比如图 4 所示[22].下面,我们将对动态频谱管理中的集中式管理架构和分布式管理架构进行详细的阐述.

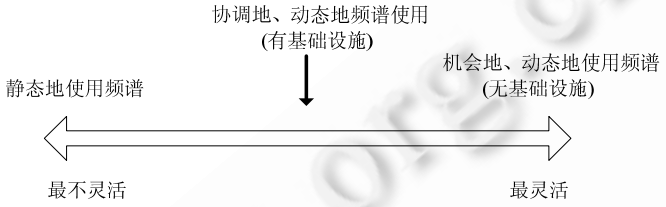

Fig.4 Spectrum management taxonomy[22]

图 4 频谱管理结构分类[22]

4.1.1 集中式管理架构

DIMSUMnet[23]是较早提出的集中式频谱管理架构,主要面向较大区域内且包含多个异构无线网络的场景.该区域内可能存在蜂窝网络、固定的无线传输链路、WiMAX、WLAN、Mesh 网等多种异构无线网络.频谱分配的过程首先是由基站/接入点等设备向本区域的资源管理模块(RANMAN)提出频谱申请,RANMAN 与集中的频谱中介进行协商来租约频谱,如果租约成功,则将频谱分配给基站/接入点,基站/接入点再根据用户的需求为用户进行频谱分配.其主要思想为:集中的频谱中介掌握异构网络的分布情况,能够协调各个网络之间的频谱使用,提高资源的利用效率.DSAP[24]是一种参考了 DHCP 模型的频谱分配协议框架.DSAP 与 DIMSUMnet 框架呈现互补的关系:DIMSUMnet 是一个适用于较大区域、多网络的频谱管理结构;而 DSAP 适用于局部的、用户密集分布的小区域,如 WLAN 中一个 AP 的覆盖范围.DSAP 的结构中包含 DSAP server,DSAP client 和 DSAP relay 这 3 种实体.协议的通信过程与 DHCP 分配的过程类似,DSAP client 向 DSAP server 发送频谱租借请求,DSAP server 位于 AP 之后,响应 DSAP client 的请求.与 DHCP 的不同之处是:DSAP client 可以收到多个 server 发来的回复,可根据需求和反馈,选择其中之一进行接入.传输结束后,释放租借的频谱.DSAP relay 用于多跳的频谱租约,即,一些 DSAP clients 可作为另外一些 DSAP clients 的租约中介.IEEE 为了更好地利用“白空间”频段,在过去的几年内推进了相关标准的制定,主要包括 802.22[25]和 802.11af[26].IEEE 802.22 是利用认知无线电的较长距离无线网络标准,也称为无线区域网(WRAN)标准,其主要设计目的为机会地利用空闲的“白空间”频段.802.22 网络由基站与一些受基站控制的 CPE 构成.CPE 收集本地的频谱使用信息并定期地反馈给基站,基站通过收到的各 CPE 信息判断网络环境的变化以及是否需要调整频谱的使用.相邻基站之间可以利用通信协议避免使用同一频率造成干扰.802.11af 与 802.22 互补,属于短距离无线网络标准,在 802.11(WLAN)的基础上扩展而来,802.11af AP 与“TV WS”数据库交互,确认当前可用的“白空间”频段,终端经过 AP 的准入后,竞争使用可用频段.

认知无线电用户(CR 用户)机会地使用频谱的模式与经济学中博弈等模型类似,因此,博弈、竞价和拍卖等经济学模型被较多地引入到认知无线电的频谱管理中.非合作博弈、合作博弈中的讨价还价模型一般被应用于终端分布式竞争频谱的场景.竞价、拍卖以及合作博弈中的联盟博弈模型由于需要仲裁中介,结构一般为集中

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

式.由于模型和场景各异,相关的研究较多,本文不再一一详述,主要总结出两类主要的集中式架构:一种类型为多个竞争者向资源持有者竞争资源[27,28];第 2 种为竞争者一方面要向资源持有者竞争资源,另一方面要为服务使用者提供定价,两个方面均衡折中从而获取利益[29,30].文献[27,28]以主用户为拍卖商,即,多个 CR 用户向主用户竞价,主用户选择是否将频谱租借给 CR 用户.文献[29,30]针对未来可能出现的多服务商竞争频谱的场景设计管理架构和运营模式,在文献[29]提出的机制中,由频谱策略服务器(SPS)来集中管理频谱资源,SPS 首先收集终端信息并提供给多个运营商,多个运营商通过竞价的方式来决定能否获得频谱并为终端提供服务.文献[30]中多服务商竞争频谱的方式与文献[29]类似,各服务商向集中的频谱中介来竞争频谱,不同之处在于:文献[30]引入了虚拟服务商(MVNO)的概念,网络终端和服务商之间存在一个服务中介,即 MVNO,目的是解耦服务商和终端的绑定,终端可以选择不同的服务商进行接入.

由于面向的场景不同,设计的目标存在差异,集中式的动态频谱管理架构类型多样.但大多数架构之间有类似之处:至少包含集中管理单元、被管理单元及各单元之间的通信协议.图 5 对几个典型的集中式管理架构进行了展示.集中管理单元,如 RANMAN 实体、DSAP server、802.11 基站,负责分配频谱资源;被管理单元如图 5(a)中的基站、图 5(b)中的终端、图 5(c)中的 CPE(可视为终端),需要使用频谱资源.通信协议主要包括频谱请求、频谱配置及信息反馈.被管理单元向集中管理单元发起资源申请,集中管理单元告知被管理单元如何使用资源.此外,全部或者部分被管理单元需进行频谱感知,收集附近频谱使用情况,包括主用户到达等信息,定时地向集中管理单元反馈.

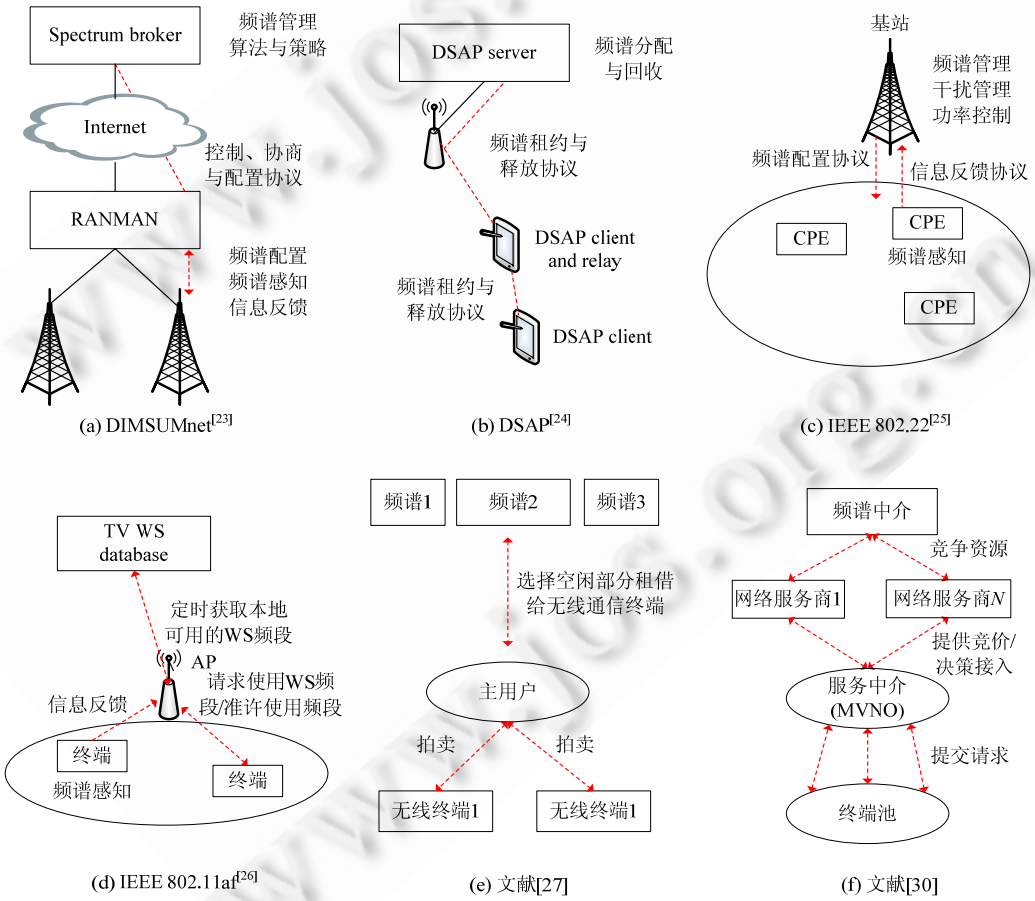

Fig.5 Several typical infrastructure-based spectrum management framework

图 5 几种典型的集中式频谱管理架构

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

为保证各单元能够及时收到频谱管理相关信息,通信协议一般工作在专用的控制信道,控制信道的设计不在本文的讨论范围,这里不再赘述.

动态频谱管理的集中式架构与第 2.2 节提到的集中式信道规划有相似之处,也有不同之处:类似之处在于,均存在集中管理单元和被管理单元,由集中管理单元集中计算,并为被管理单元分配频谱资源;不同之处在于,集中式信道规划并不需要专门设计各单元之间的通信协议,即,被管单元(AP)不需要定期地向集中管理单元(无线网控制器)提交请求和反馈信息,而是由集中管理单元按需采集信息,并对被管单元进行信道配置,利用简单的网络管理协议即可实现.然而在动态频谱管理的集中式架构中,各单元之间的通信协议是重要的组成部分,其中涉及到诸多问题,如:是否使用公共控制信道;如何选择部分被管理单元反馈信息、规划被管理单元反馈信息的内容、周期等.

4.1.2 分布式管理架构

DAPRA 下一代通信研究计划是动态频谱管理相关研究的最初驱动力量,项目提出的 DARPA's XG 结构是一种有代表性的分布式管理结构[31].DARPA's XG 最早提出了 OSA(opportunistic spectrum access)的概念,主要的原则是以"不引起恶化(cause-no-harm)"为目标,认知无线电用户机会地使用空闲频谱.在 OSA 的结构中,认知无线电终端相关模块主要包含 3 个功能:软件定义的调制解调、频谱监测和策略控制[32].软件定义的调制解调包括调制、编码、调度等功能;频谱监测提供对环境的感知能力,包括主用户的活动以及其他认知无线电用户的情况;策略控制负责规则和策略的设定及转换,终端按照策略使用频谱.

由于不需要引入新的网络单元而是在终端进行升级,因此分布式的频谱管理结构较为简单,从全局来看,与 ad hoc 网络结构是类似的.图 6[33]对比了集中式管理架构和分布式管理架构,可以看到:在集中式管理架构中,终端为管理单元提供信息,管理单元做出决策并指导终端的配置;在分布式架构中,局部网络信息的感知、决策与重新配置均发生在终端.功能分布在终端的优点在于可以提高灵活性和可扩展性,但是复杂的网络环境以及终端的非理性行为使得网络的可控可管性较差,并且不能从全局的角度提高资源利用率,个别终端处于局部最优状态,很可能导致整个区域的网络性能恶化.因此,大多数研究认为,集中的控制单元是有必要存在的.但是从目前的研究现状来看,管理架构与机制需要进一步设计,使得控制单元对一定区域内的资源进行适度的动态管理,避免因为复杂度高和区域过大而引发实时性问题.不同区域之间的资源利用,可以通过多个控制单元之间的通信来进行协调,这就需要对控制单元的负责区域进行划分以及对控制单元之间的通信进行设计.

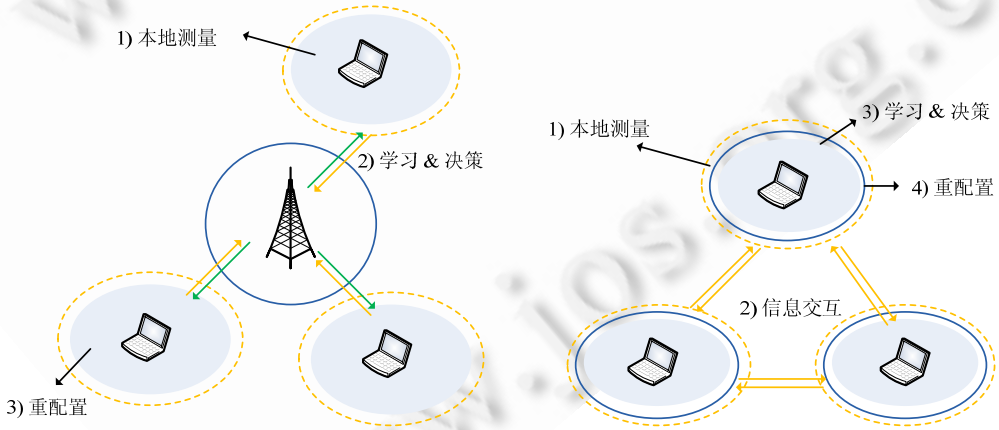

Fig.6 Infrastructure-Based and infrastructure-free frameworks[33]

图 6 集中式与分布式结构对比[33]

4.1.3 频段宽度的影响

动态频谱管理的灵活性之一体现在频谱宽度的可调整上,可变的频宽是影响带宽的重要参数.有相当多的

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

研究将频段、频谱宽度、中心频率等特点统一抽象为系列网络性能参数,包括吞吐量、延迟、传输成功率等.频谱管理机制则直接以更好的网络性能为追求的目标,这些研究之间主要的区别在于目标函数的定义以及所采用的理论手段的不同.例如:

- 文献[34]将频谱看作时间、频段、空间的资源块,将频谱分配的问题定义为装箱问题,然后对接收端收到的数据量建模,如公式:

$$C_{ij}(B_{ij}^k)=\Delta f_k\times A(f_k,\Delta f_k)\times\Delta t_k\times B(\Delta t_k).$$

  对于一条采用了资源块 B_{ij}^k 的链路,接收数据量 $C_{ij}(B_{ij}^k)$ 受到频宽Δf_k、使用时间Δt_k、频段可用性(包括干扰、硬件条件等)A 函数、协议开销 B 函数的影响.频谱分配追求的目标为:在不为互相干扰的链路分配重叠频谱的前提下,优化上式中的 C_{ij} 值;
- 文献[35]首先分析如何选择部分信道去感知,从而减少监听的开销,并且有效地发现可用频段.探测之后,针对几个可用的频段,考虑信道状况,如信道宽度、SNR 以及预计信道的可使用时间,估算在下一次切换信道之前能够获得的吞吐量,最后选择能获得最大吞吐的信道;
- 文献[36]采用了多人博弈的模型,博弈的效用函数为香农公式对 SNR 的转换,即:博弈者均追求理论上的传输速率,选择同一信道的终端在博弈过程中妥协、降低自己的效用函数,从而达到均衡状态;
- 文献[37,38]不是通过计算的方式得到各频段的特性,而是采用学习的手段,选择表现更优的可用频段.文献[37]引入随机自动机学习模型,以传输成功率最高为目标,在每个时槽内的传输失败和成功都纳入信道传输成功率的计算,初始时,终端随机接入并进行传输,通过学习和调整,最后收敛到一个较好的信道上.类似地,文献[38]引入增强学习的方法,通过学习不同信道上包传输成功概率,选择更优的信道.
- 前面提到的大部分研究均是通过频谱选择策略来最大化自身收益,文献[39]则提出一种考虑整个系统负载均衡的信道选择算法,在终端用 PRP $M/G/1$ 队列对各个信道的状态建模,队列中体现了主用户和信道上其他认知无线电用户的影响,算法的目标为减少传输总时间.

上述研究均利用了频宽和带宽之间的简单映射,忽略了频谱宽度变化所带来的影响.理论上讲,频谱的宽度增加 1 倍,吞吐也会提高 1 倍,然而实际网络环境下的情况和理论有一定差距.Chandra 等人[40]为探究动态频宽的影响,在 Atheros 的网卡上通过修改 802.11 的驱动代码,实现了可调整频宽至 5MHz,10MHz,20MHz,40MHz.测量结果表明:频谱宽度增加 1 倍,吞吐量增加不到 1 倍.这是因为协议中有些固定的协议参数,如时槽时间,相对来说在宽频上的传输开销更大.Rayanchu 等人[41]的测量结果显示:频宽增加 1 倍,吞吐量可能增加接近 1 倍,可能增加不到 1 倍,还有可能减少.Rayanchu 等人对减少的原因进行了分析,主要包括两点:首先,当传输的频宽度由 20MHz 变为 40MHz 后,由于发射功率没有变化,因此每 Hz 的能量变少,导致 SNR 降低,从而影响到传输性能.另外,存在隐藏链路和暴露链路对吞吐量的影响.文献[41]在文献[40]的基础上,从一条链路扩展至多链路,分析频谱宽度变化对整个网络的影响.主要根源为:频宽不同意味着信号传输距离不同,这将导致暴露链路和隐藏链路的数量和位置会发生变化.文献[41]中也通过测量验证了这一点.在观察测量结果的基础上,该文还设计了为数据包分配频谱的方法,该方法代价较高,需要对网络内所有链路在不同的配置下进行全面的测量.Bahl 等人[42]基于点对点的认知无线电实验系统 KNOWS,设计了类似于 802.11 协议的通信机制 White-Fi 来使用“白空间”,并不简单地追求最大频谱宽度,AP 在选择工作频段时考虑到两点:第一,频谱对于连接到该 AP 的所有终端可用;第二,估计在各个信道上可能获得的传输时间(air-time).综合起来选择合适的若干信道绑定使用.实际上,White-Fi 测量 air-time 的方法隐含地考虑了绑定过多信道时可能受到其他链路的干扰,但是 Bahl 等人没有考虑频谱宽度和信号传播距离的关系,从单一 AP 的角度进行频谱选择,忽略了使用不同频段对用户的影响以及对周围 AP 的影响.总的来看,目前仍然缺乏系统性的研究以及在考虑上述实际因素的情况下,设计动态分配频宽、中心频率的方法.

4.1.4 频段高低的影响

不同频段上的无线信号衰减特性不同,仅 WLAN 使用的两个 ISM 频段(2.4GHz 和 5.8GHz)的信号传播距离就有明显的差异,开放的几个“白空间”频段具有更大的差异,这给频谱管理增加了新的参数.文献[43]指出:相对

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

高的频段上的频谱空间因其传输距离过短,基本上不可利用.此外,功率设置、频谱宽度也会导致信号传播范围存在差距.文献[34]指出:在功率相同的情况下,频宽的增加使得 SNR 降低.因此在一些 SNR 较差的情况下,分配窄的频谱来传输反而能提高性能.该研究中仅考虑了同一频段、不同频宽的影响,多种频谱资源共存的情况下,频宽和传输距离等因素的折中考虑会更加复杂.

文献[44]分析了动态频谱使用中的几个特点:(1) 不同频率上的信号传播有差异,低频信号传输的距离更远;(2) 信号的传播不能够被严格控制,部分信号会干扰到相邻的区域;(3) 通信时频谱宽度可动态变化,同样会导致信号传播距离发生改变.由于第(1)点和第(3)点,系统内建立干扰图将面临很大的挑战,因为频段和频宽均会影响到干扰的情况.另外,由于第(1)点和第(2)点,频段之间的保护间隔需要根据具体情况来设定,而不是像传统的 WLAN 中全部设置固定的间隔.类似于文献[34]的观点,文献[44]也提出:在相同功率情况下,窄的频段能够覆盖较大范围,这样的特性应该被合理地利用.同时,传输距离远固然有优势,但也更容易造成干扰,这些因素在动态频谱管理的设计中都不容忽视.

4.1.5 用户应用的影响

终端使用不同的频段、频宽等,会直接影响到吞吐量、延迟、抖动、丢包率等网络指标.从根本上来说,频谱的分配是为应用提供服务和支持,而应用对网络指标的需求不同,因此在频谱资源与应用需求之间应存在一个合理的匹配.

文献[45]提出的用户负载感知的频谱分配,已初步考虑频谱与终端需求的匹配.文献[46]指出了应用与频谱之间匹配的重要性,对于实时性应用来说,有些频段虽然带宽高,但由于主用户的原因导致终端频繁切换,会严重影响应用的体验.另外,对一些低流量、突发型的应用,如 Web 等,不合理地为之分配较宽的、空闲时间长的频段,将造成资源的浪费.文献[47]在应用所产生的影响的基础上提出了频谱分配的博弈框架,终端的外部行为包括提出频谱需求、进行竞价等,而终端的内部行为决定如何发送数据包,这涉及到跨层操作,会对终端的博弈状态产生影响,从而影响未来的外部行为.文献[48]的主要贡献在于,将应用层对 QoS 的需求和频谱选择相应的动作均作了形式化处理,并把两者进行映射,然后,通过实验验证了不恰当的动态频谱选择反而会降低应用体验.之前的大多数研究并不考虑应用的需求,应用感知的频谱分配仍处于初步研究阶段.以终端为单位的分配可能造成资源浪费,但若按照应用来分配资源,同一终端可能运行多种不同类型的应用.针对这样复杂却又普遍存在的场景,目前仍没有有效的频谱管理机制.

4.1.6 主用户特点的影响

网络中用户流量和应用的需求是动态频谱设计需要考虑的重要因素;除此之外,使用“白空间”频段的用户与传统无线网络用户的最大区别在于需要无条件地避让主用户,即 TV、无线麦克等授权用户.频繁的避让意味着频繁切换通信频段,严重影响了传输性能,因此,主用户的活动是动态频谱需要考虑的一个新的特点.有较多的研究希望通过对各频段用户行为的预测来选择更好的频段接入.文献[49]提到:当前对主用户流量的预测大多采用开关(ON/OFF)模型,基于该模型可以预测 ON 状态和 OFF 状态对应的时间.文献[50]对信道上的流量进行抽样探测,根据最近小段时间内的历史值对未来信道可能出现的不同类型的主用户流量(如起始、结束时间是确定的或者随机的)进行估计,预测各信道的空闲时间,选择主用户出现时间最少的信道;并且在预测到主用户即将到来时,提前为认知无线电用户(CR)终端切换信道.文献[51]认为:传统工作中对确定流量的建模比较成熟,对随机流量建模一般采用指数分布的泊松过程,而帕累托分布更适合于主用户行为建模.文献[52]同样是对信道中可能出现的流量进行预测,但仅考虑当主用户和 CR 用户都只有语音流量时,利用移动通信网络中语音流量呈现的特性对主用户的行为进行建模,CR 用户根据预测结果选择是否使用频段,实际上是主用户阻塞率和 CR 终端切换信道频率的一种折中.另外,有其他研究借助于神经网络来对主用户流量进行预测.文献[53]认为:实际的主用户流量具有不可预知的特性,多层感知器不需要提前预知信息就能够预测信道中的流量.文献[54]并不对流量进行采集和预测,而是通过一种增强学习的方式,使终端每次选择一个过去使用成功率最高的信道.每当传输结束,根据传输情况为信道增加或者减少权重,可供以后的传输参考.由于在较长时间内某一频段上的主用户活动相似性较高,这样的方式同样可以达到对主用户行为预测的效果.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

4.1.7 频谱与能耗的关系

在无线传感器网络和 Ad hoc 网络中,能耗是关键的约束因素,相关的路由协议和频谱分配设计均将能耗纳入到考虑范围之内.在认知无线网络设计中,能耗的考虑也得到了相关研究的重视[55].大部分认知无线电网络中的节能研究,一般把终端频谱感知所耗费的能量作为约束[56].这是因为,要动态使用“白空间”,就必须实时地感知周期频谱使用情况以及主用户状态,这使得频谱感知的过程耗费较多的能量.由于近年来网络设备的大量布设,在非自组织的、依赖基础设施的无线网络中(WLAN,cellular,superWi-Fi 等),基础设施的能耗问题凸显出来,在面向未来无线网络的频谱管理中,节能是重要目标之一.文献[34]的另一个测量结果表明:频宽较窄的频段,无论在传输、接收数据时还是在空闲时刻,所消耗的能量都比较宽频段要少.因此在网络负载低的时段,可以使用宽度较窄的频段,不仅能够减少能耗,还能利用到窄频段的其他优势,如传播距离较远等.除此之外,在低负载时段,网络内存在大量的空闲 AP 或基站,可以通过关闭部分空闲设备来节省能耗,然后对剩余设备使用的频谱进行重新分配与调整,在节省能源的同时,提高频谱资源利用效率,这方面的研究目前还比较少.

4.1.8 频谱资源与有线接入网资源的匹配

频谱作为一种网络的基础资源,它的管理应该与其他网络资源联合考虑,从整体的角度优化资源分配.例如,频谱的分配应与有线接入网链路带宽、优先级有一定的匹配,这样就可以避免链路瓶颈所造成的资源浪费.这一因素不属于动态频谱本身的影响,而是为进一步提高频谱管理效率所应该考虑的其他资源因素.随着无线传输技术的发展,无线网络的带宽迅速提高,从最初 802.11b 中 11Mpbs 的物理层速率,到现在 802.11ac 速率可达 Gbps.日益增长的流量开始给有线接入网带来压力,即,从无线接入点到出口网关之间的有线通道可能成为瓶颈.因此我们认为:在应用动态频谱管理的网络中,频谱资源的分配应将有线接入链路的限制考虑在内,例如在某些有线链路发生拥塞的情况下,无线网频谱资源的分配可相应减少,即,形成有线、无线接入一体化的网络,统一调度资源.一体化网络的研究在国内最早提出时主要考虑协议栈层面的一体化[57].在软件定义网络(SDN)相对成熟的今天,国外相关研究拟采用 SDN 的技术,同时对有线接入链路资源和无线接入频谱资源进行联合的分配,在满足应用需求的同时,提高整体的资源利用效率.目前,已有研究综合考虑无线接入和其后接入的有线网络.斯坦福的 OpenRadio 项目[58]采用 SDN 技术路线设计下一代无线网络结构,以实现统一的软件定义接口,对异构的无线网络进行动态地管控,为不同的流量相应地设定转发路径、接口优先级、无线网空口资源等,如图 7 所示.目前,该项目发布了关于可编程物理层的研究[59].文献[60]在蜂窝网络中引入 SDN 来从全局上控制基站的频谱资源,实现优化干扰和提高利用率的目标,虽没有联合管理有线网络资源,但是 SDN 的引入,为资源统一管理奠定了基础.另外,Odin[61]和 OpenRoads[62]将 SDN 的思想应用到无线网络中,用来维护用户状态,解决漫游相关问题.

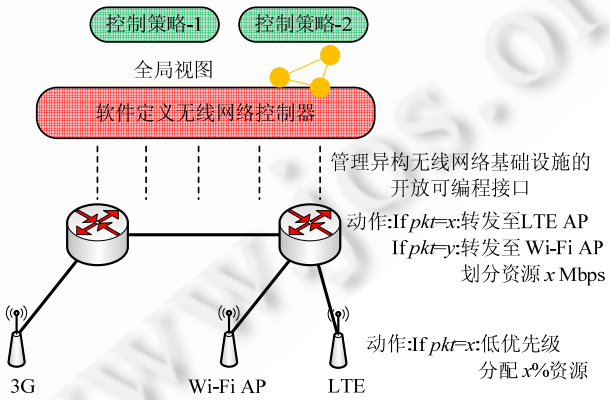

Fig.7 Programmable infrastructure of integrated wireless access networks[58]

图 7 可编程的一体化无线接入网[58]

SDN 近年来受到了极大的关注,它能够提高网络的灵活性,有利于动态管理与资源调度,将 SDN 应用于频

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

谱管理,可以从全局的角度管理异构网络的频谱资源以及有线接入网资源.SDN 能够给无线网络中面临的传统问题带来新的解决办法,目前国内外研究还处于起步阶段.

5 频谱管理未来研究思考

本文第 2 节和第 3 节的分析已表明:传统的静态频谱管理方法不能高效利用稀缺的频谱资源,难以应对激增的、动态性强的网络流量.因此,对于 ISM 频段以及未来“白空间”频段的使用,将采取主流的动态频谱管理方法.通过对已有研究的分析和对比,本节从架构和关键要素两个方面对频谱管理未来的研究发展趋势进行思考和展望.

5.1 架构方面

- 层次化的频谱管理

第 3 节中介绍了分布式和集中式两种频谱管理架构,两种架构各有其优势和劣势.集中式架构更容易对网络的资源进行控制,便于提高系统效率,其劣势在于当用户过多时,开销增大,难以保证实时性;分布式架构灵活度高,对终端的数量没有限制,可扩展性强,也不存在与控制单元的通信,因此实时性能够得到保证,但是终端的非理性行为、协议类型不同、多样的策略使得网络的情况非常复杂,终端的个体行为很可能使得整个区域的性能严重降低.通过对两种架构的分析和比较,我们认为:在传统频谱、“白空间”频谱共存、多种异构网络重叠的场景下,集中式的频谱管理更为合适.但是为了保证实时性和架构的可扩展性,可以设计层次化的集中式管理,即:在一定区域内集中式控制,区域之间通过通信机制进行协调,各区域之上也可以存在总的控制单元.文献[23]就提到了一种类似于分层次的集中式管理,然而控制单元所管控的区域规划、区域之间控制单元的通信等仍有待进一步加以研究.另外,层次化的频谱管理除了上述含义外,也可以将分布式和集中式的结构进行融合,综合两种方式的优势.例如,集中控制器负责为 AP 分配频谱,而 AP 之下的动态频谱接入则由终端分布式进行.这样既保证了一定的可控性,也提高了灵活度.

5.2 关键要素方面

本文第 3.2 节分析了动态频谱管理中的几个关键要素,包括频谱特性、用户动态特性和其他资源约束.已有的研究大多以单一要素为目标,如优化带宽、传输数据总量、传输成功率等.为了提高频谱资源的使用效率、提高网络容量和应用体验,在设计动态频谱管理机制过程中,往往需要考虑多方面的要素以及要素之间的匹配.具体来讲,各段频谱的可用宽度不同、特性各异,频谱管理需动态地对频谱资源和终端能力、应用需求进行合理的匹配,同时考虑其他资源的约束.因此我们认为,频谱管理过程应对以下几种类型的信息进行感知,进而结合频谱资源的特性进行高效的资源分配.

- 位置信息感知

频谱资源的管理需要考虑终端的位置信息,即,终端接入各个频段的能力.当终端能够同时接入多个频段,这些频段的传输距离长短不一、频宽各异,而终端感知到的信噪比也决定了传输性能的差异.如何为终端分配频谱是一个十分复杂的问题,此时应将频段特点、终端位置信息、应用需求有机地结合起来,然后进行高效的资源分配.终端位置信息的感知一般通过提取信号强度、信噪比等参数获得,对于当前网络来说,获取终端位置信息的挑战主要在于:在多网络覆盖、多频段可用、多协议共存的情况下,缺乏统一的框架及机制提取和运用终端位置信息.IEEE 在制定 802.11af 标准的过程中,允许终端通过 GPS 获取自身位置信息并提交到网络,从而确定终端可用的频段.这种方法初步给出了利用终端位置信息的协议框架,但 GPS 所获取的仅是终端的大致位置,并不能确定终端接入各个网络的能力,更详细的位置信息提取和利用仍有待研究.

- 跨层信息感知

不同的应用对网络的需求有所不同,如高带宽应用、延迟敏感应用、小流量突发应用等.相应地,频谱资源也存在着区别,如较宽的空闲频段、干扰较少频段等.应用需求与频谱资源的匹配需要结合不同层次的网络信息,跨层信息感知并不是新的话题,在无线传感器网络[63]中,路由的计算和调整与无线频谱密切相关[64].在动态

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

频谱管理中,为提高资源利用效率,深度跨层感知变得尤为重要.跨层信息感知存在两个主要的难点:第一,感知机制的设计可能需要修改终端协议栈或者引入新的协议,已有较多研究关注这方面内容;第二,在同一终端运行多个应用的情况下,如何对多个应用进行感知,并相应地分配频谱资源,目前并没有有效的解决方法.

- 能耗感知

绿色的频谱管理方案也是未来研究应重点关注的内容.无线网络的能耗随着基础设施的大量部署而急剧增长,绿色的运营管理策略是当前的研究热点.频谱管理与无线网络能耗密切相关,主要体现在 4 个方面.

- 第一,在无线通信终端使用“白空间”频段时,如果主用户活动频繁,终端需较多地切换工作频段,导致能量浪费;
- 第二,不同频段上的信号覆盖相同的范围,所消耗的能量不同;
- 第三,文献[34]证明,宽度较窄的频段在传输、接收数据包以及空闲时刻耗能相对较少;
- 第四,为节省能耗,关闭部分设备(如基站、AP 等)之后,应对剩余设备使用的频谱进行重新规划.

以上几个方面,仅有第 1 个问题有较多相关研究,频谱管理还应考虑后面的 3 个因素,在提高频谱使用效率、优化网络性能、降低运营能耗等多个目标中间寻求平衡点.

- 有线接入资源感知

移动流量以及无线网络带宽增长迅速,未来有线链路可能成为网络传输的瓶颈,导致浪费十分稀缺的频谱.因此,有必要将无线接入网资源与有线接入网资源进行联合管理,即:在无线资源调度分配过程中考虑有线接入网能够提供的路径和资源限制,避免因不匹配而造成频谱资源的浪费.同时,为一些应用,如延迟敏感型、高带宽型应用,相应地选择转发路径和分配频谱资源,形成面向应用的一体化的资源调度方法.软件定义网络(SDN)及软件定义无线电(SDR)技术为资源联合调整提供了可能.

6 结 论

频谱资源管理是宽带无线网络领域的研究热点,传统的静态频谱管理方法缺乏灵活性,效率低,造成资源浪费,难以应对流量、应用和干扰的动态性.在“白空间”频段开放出来后,动态频谱管理有了发挥作用的空间,也成为未来的必然选择.所以,很多学者致力于研究动态频谱管理方法,通过高效、动态地使用传统 ISM 频段及“白空间”频段来弥补传统静态方法的不足.本文根据频谱管理的发展趋势对无线网络频谱资源管理问题作了较为深入的探讨.

(1) 对无线网络频谱资源进行了概述,分析了当前频谱管理面临的挑战;
(2) 以 WLAN 为例,分析了传统的静态频谱管理方法,指出了传统频谱管理方法的不足之处,并表明按需地、动态地管理频谱是必然选择;
(3) 从管理架构和关键要素两个方面对动态频谱管理进行了详细的阐述;
(4) 对频谱管理的未来研究发展趋势进行了思考和展望.

经过对相关研究的分析和思考,本文指出了终端信息感知、面向应用的频谱资源适配、绿色的频谱管理、无线网络频谱资源和有线网络带宽资源的联合调度等几个重要的方向仍有待于进一步加以研究.综上,希望对宽带无线网络频谱资源管理的分析和评述能为该领域的研究者提供一些有益的启示.

致谢 感谢清华大学网络科学与网络空间研究院、无线移动网络实验室的各位老师、同学给予的帮助与支持.

References:

[1] IEEE 802.11 Working Group. IEEE 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. IEEE STD, 2012. 1–2793.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

[2] IEEE 802.11 Working Group. Supplement to IEEE 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: High-Speed physical layer in the 5 GHz band. IEEE STD. 1999.

[3] UMTS Forum. Mobile traffic forecasts 2010-2020. Technical Report, No.44, 2011. http://www.umts-forum.org/component/option, com_docman/task,cat_view/gid,485/Itemid,213/

[4] Pickavet M, Vereecken W, Demeyer S, Audenaert P, Vermeulen B, Develder C, Colle D, Dhoedt B, Demeester P. Worldwide energy needs for ICT: The rise of power-aware networking. In: Proc. of the IEEE 2nd Int'l Symp. on Advanced Networks and Telecommunication Systems (ANTS). 2008. 1−3. [doi: 10.1109/ANTS.2008.4937762]

[5] Force FCCSPT. Report of the spectrum efficiency working group. 2002. http://www.fcc.gov/sptf/reports.html

[6] Notice of proposed rulemaking and order. Federal Communications Commission. Technical Report, ET docket No.03-222, 2003. http://web.cs.ucdavis.edu/~liu/289I/Material/FCC-03-322A1.pdf

[7] FCC adopts rules for unlicensed use of television white spaces. Federal Communications Commission. Technical Report, 2008. https://apps.fcc.gov/edocs_public/attachmatch/DOC-286566A1.pdf

[8] Jondral FK. Software-Defined radio: Basics and evolution to cognitive radio. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2005,2005(3):275−283. [doi: 10.1155/WCN.2005.275]

[9] Youngseok L, Kyoungae K, Yanghee C. Optimization of AP placement and channel assignment in wireless LANs. In: Proc. of the 27th Annual IEEE Conf. on Local Computer Networks (LCN). 2002. 831−836. [doi: 10.1109/LCN.2002.1181869]

[10] Ling X, Yeung LK. Joint access point placement and channel assignment for 802.11 wireless local area networks. In: Proc. of the IEEE Wireless Communications and Networking Conf. (WCNC), Vol.3. New Orleans, 2005. 1583−1588. [doi: 10.1109/WCNC. 2005.1424750]

[11] Eisenblatter A, Geerdes HF, Siomina I. Integrated access point placement and channel assignment for wireless LANs in an indoor office environment. In: Proc. of the IEEE Int'l Symp. on World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM). Helsinki, 2007. 1−10. [doi: 10.1109/WOWMOM.2007.4351711]

[12] Akl R, Arepally A. Dynamic channel assignment in IEEE 802.11 networks. In: Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Portable Information Devices. 2007. 1−5. [doi: 10.1109/PORTABLE.2007.63]

[13] Kauffmann B, Baccelli F, Chaintreau A, Mhatre V, Papagiannaki K, Diot C. Measurement-Based self-organization of interfering 802.11 wireless access networks. In: Proc. of the 26th IEEE Int'l Conf. on Computer Communications (INFOCOM). Alaska, 2007. 1451−1459. [doi: 10.1109/ INFCOM.2007.171]

[14] Achanta M. Method and apparatus for least congested channel scan for wireless access points. Int Cl: H04L 12/28. US20060072602 A1. 2006-04-06.

[15] Mahonen P, Riihijarvi J, Petrova M. Automatic channel allocation for small wireless local area networks using graph colouring algorithm approach. In: Proc. of the 15th IEEE Int'l Symp. on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC). Barcelona, 2004. 536−539. [doi: 10.1109/PIMRC.2004.1370928]

[16] Mishra A, Banerjee S, Arbaugh W. Weighted coloring based channel assignment for WLANs. ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review, 2005,9(3):19−31. [doi: 10.1145/1094549.1094554]

[17] Mishra A, Brik V, Banerjee S, Srinivasan A, Arbaugh W. A client-driven approach for channel management in wireless LANs. In: Proc. of the 25th IEEE Int'l Conf. on Computer Communications (INFOCOM). Barcelona, 2006. [doi: 10.1109/INFOCOM.2006. 195]

[18] Chen JK, de Veciana G, Rappaport TS. Improved measurement-based frequency allocation algorithms for wireless networks. In: Proc. of the IEEE Global Telecommunications Conf. (GLOBECOM). Washington, 2007. 4790−4795. [doi: 10.1109/GLOCOM. 2007.909]

[19] Tan K, Fang J, Zhang Y, Chen SY, Shi LX, Zhang JS, Zhang YG. Fine-Grained channel access in wireless LAN. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2010,40(4):147−158. [doi: 10.1145/1851275.1851202]

[20] Akyildiz IF, Lee WY, Vuran MC, Mohanty S. A survey on spectrum management in cognitive radio networks. Communications Magazine, 2008,46(4):40−48. [doi: 10.1109/MCOM.2008.4481339]

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

[21] Tragos E, Zeadally S, Fragkiadakis A, Siris V. Spectrum assignment in cognitive radio networks: A comprehensive survey. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2013,15(3):1108−1135. [doi: 10.1109/SURV.2012.121112.00047]

[22] Zhao Q, Sadler BM. A survey of dynamic spectrum access. Signal Processing Magazine, IEEE, 2007,24(3):79−89. [doi: 10.1109/MSP.2007.361604]

[23] Buddhikot MM, Kolodzy P, Miller S, Ryan K, Evans J. DIMSUMnet: New directions in wireless networking using coordinated dynamic spectrum. In: Proc. of the 6th IEEE Int'l Symp. on World of Wireless Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM). Giardini Naxos, 2005. 78−85. [doi: 10.1109/WOWMOM.2005.36]

[24] Brik V, Rozner E, Banerjee S, Bahl P. DSAP: A protocol for coordinated spectrum access. In: Proc. of the 1st IEEE Int'l Symp. on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN). Maryland, 2005. 611−614. [doi: 10.1109/DYSPAN.2005.1542680]

[25] Stevenson C, Chouinard G, Lei ZD, Hu WD, Shellhammer SJ, Caldwell W. IEEE 802.22: The first cognitive radio wireless regional area network standard. Communications Magazine, 2009,47(1):130−138. [doi: 10.1109/MCOM.2009.4752688]

[26] Flores B, Guerra E, Knightly W, Ecclesine P, Pandey S. IEEE 802.11af: A standard for TV white space spectrum sharing. IEEE Communications Magazine, 2013,51(10):92−100. [doi: 10.1109/MCOM.2013.6619571]

[27] Wang X, Li Z, Xu P, Xu Y, Gao X, Chen HH. Spectrum sharing in cognitive radio networks—An auction-based approach. IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics—Part B: Cybernetics, 2010,40(3):587−596. [doi: 10.1109/TSMCB.2009.2034630]

[28] Kasbekar GS, Sarkar S. Spectrum auction framework for access allocation in cognitive radio networks. IEEE/ACM Trans. on Networking (TON), 2010,18(6):1841−1854. [doi: 10.1109/TNET.2010.2051453]

[29] Ileri O, Samardzija D, Mandayam NB. Demand responsive pricing and competitive spectrum allocation via a spectrum server. In: Proc. of the 1st IEEE Int'l Symp. on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN). Maryland, 2005. 194−202. [doi: 10.1109/DYSPAN.2005.1542635]

[30] Sengupta S, Chatterjee M. An economic framework for dynamic spectrum access and service pricing. IEEE/ACM Trans. on Networking (TON), 2009,17(4):1200−1213. [doi: 10.1109/TNET.2008.2007758]

[31] Marshall P. DARPA progress towards affordable, dense, and content focused tactical edge networks. In: Proc. of the IEEE Military Communications Conf. (MILCOM). Baltimore, 2008. 1−7. [doi: 10.1109/MILCOM.2008.4753577]

[32] Tran C, Lu RP, Ramirez AD, *et al*. Dynamic spectrum access: Architectures and implications. In: Proc. of the IEEE Military Communications Conf. (MILCOM). Baltimore, 2008. 1−7. [doi: 10.1109/MILCOM.2008.4753454]

[33] Akyildiz IF, Lee WY, Chowdhury KR. CRAHNs: Cognitive radio ad hoc networks. Ad Hoc Networks, 2009,7(5):810−836. [doi: 10.1016/j.adhoc.2009.01.001]

[34] Yuan Y, Bahl P, Chandra R, Moscibroda T, Wu Y. Allocating dynamic time-spectrum blocks in cognitive radio networks. In: Proc. of the 8th ACM Int'l Symp. on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (Mobihoc). Montreal, 2007. 130−139. [doi: 10.1145/1288107.1288125]

[35] Min AW, Shin KG. Exploiting multi-channel diversity in spectrum-agile networks. In: Proc. of the 27th IEEE Conf. on Computer Communications (INFOCOM). Phoenix, 2008. 1921−1929. [doi: 10.1109/INFOCOM.2008.256]

[36] Pham HN, Xiang J, Zhang Y, Skeie T. QoS-Aware channel selection in cognitive radio networks: A game-theoretic approach. In: Proc. of the IEEE Global Telecommunications Conf. (GLOBECOM). New Orleans, 2008. 1−7. [doi: 10.1109/GLOCOM.2008.ECP.934]

[37] Song Y, Fang Y, Zhang Y. Stochastic channel selection in cognitive radio networks. In: Proc. of the IEEE Global Telecommunications Conf. (GLOBECOM). Washington, 2007. 4878−4882. [doi: 10.1109/GLOCOM.2007.925]

[38] Yau KLA, Komisarczuk P, Teal PD. A context-aware and intelligent dynamic channel selection scheme for cognitive radio networks. In: Proc. of the 4th IEEE Int'l Conf. on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications (CROWNCOM). Hannover, 2009. 1−6. [doi: 10.1109/CROWNCOM.2009.5189427]

[39] Wang LC, Wang CW, Adachi F. Load-Balancing spectrum decision for cognitive radio networks. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2011,29(4):757−769. [doi: 10.1109/JSAC.2011.110408]

[40] Chandra R, Mahajan R, Moscibroda T, Raghavendra R, Bahl P. A case for adapting channel width in wireless networks. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2008,38(4):135−146. [doi: 10.1145/1402946.1402975]

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

[41] Rayanchu S, Shrivastava V, Banerjee S, Chandra R. FLUID: Improving throughputs in enterprise wireless LANs through flexible channelization. IEEE Trans. on Mobile Computing, 2012,11(9):1455−1469. [doi: 10.1109/TMC.2012.89]

[42] Bahl P, Chandra R, Moscibroda T, Murty R, Welsh M. White space networking with Wi-Fi like connectivity. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2009,39(4):27−38. [doi: 10.1145/1594977.1592573]

[43] Brown TX, Sethi A. Potential cognitive radio denial-of-service vulnerabilities and protection countermeasures: A multi-dimensional analysis and assessment. Mobile Networks and Applications, 2008,13(5):516−532. [doi: 10.1007/s11036-008-0085-x]

[44] Deb S, Srinivasan V, Maheshwari R. Dynamic spectrum access in DTV whitespaces: Design rules, architecture and algorithms. In: Proc. of the 15th ACM Annual Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking (MOBICOM). Beijing, 2009. 1−12. [doi: 10.1145/1614320.1614322]

[45] Chen J, Wu JP, Li HW. Spectrum allocation algorithm based on user allocation and load. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2013,24(7):1638−1649 (in Chinese with English abstract). http://www.jos.org.cn/1000-9825/4312.htm [doi: 10.3724/SP.J.1001.2013.04312]

[46] Jo O, Cho DH. Efficient spectrum matching based on spectrum characteristics in cognitive radio systems. In: Proc. of the IEEE Wireless Telecommunications Symp. (WTS). Pomona, 2008. 230−235. [doi: 10.1109/WTS.2008.4547569]

[47] Van der Schaar M, Fu F. Spectrum access games and strategic learning in cognitive radio networks for delay-critical applications. Proc. of the IEEE, 2009,97(4):720−740. [doi: 10.1109/JPROC.2009.2013036]

[48] Kumar A, Shin KG. Application-Aware dynamic spectrum access. Wireless Networks, 2012,18(3):257−275. [doi: 10.1007/s11276-011-0398-8]

[49] Marinho J, Monteiro E. Cognitive radio: Survey on communication protocols, spectrum decision issues, and future research directions. Wireless Networks, 2012,18(2):147−164. [doi: 10.1007/s11276-011-0392-1]

[50] Hoyhtya M, Pollin S, Mammela A. Performance improvement with predictive channel selection for cognitive radios. In: Proc. of the 1st IEEE Int'l Workshop on Cognitive Radio and Advanced Spectrum Management (CogART). Aalborg, 2008. 1−5. [doi: 10.1109/COGART.2008.4509983]

[51] Hoyhtya M, Pollin S, Mammela A. Classification-Based predictive channel selection for cognitive radios. In: Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Communications (ICC). Cape Town, 2010. 1−6. [doi: 10.1109/ICC.2010.5501787]

[52] Li X, Zekavat SA. Traffic pattern prediction and performance investigation for cognitive radio systems. In: Proc. of the IEEE Wireless Communications and Networking Conf. (WCNC). Las Vegas, 2008. 894−899. [doi: 10.1109/WCNC.2008.163]

[53] Tumuluru VK, Wang P, Niyato D. A neural network based spectrum prediction scheme fo gnitive radio. In: Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Communications (ICC). Sydney, 2010. 1−5. [doi: 10.1109/ICC.2010.5502348]

[54] Jiang T, Grace D, Liu Y. Cognitive radio spectrum sharing schemes with reduced spectrum sensing requirements. In: Proc. of the IET Seminar on Cognitive Radio and Software Defined Radios: Technologies and Techniques. London, 2008. 1−5. [doi: 10.1049/ic:20080404]

[55] You XH, Wang J, Zhang P, Li SQ, Zhu JK. Study and ideas for green wireless mobile communications. Journal of University of Science and Technology of China, 2009,10:1009−1015 (in Chinese with English abstract).

[56] Ngo DT, Le-Ngoc T. Distributed resource allocation for cognitive radio networks with spectrum-sharing constraints. IEEE Trans. on Vehicular Technology, 2011,60(7):3436−3449. [doi: 10.1109/TVT.2011.2157845]

[57] Dong P, Qin YJ, Zhang HK. Research on universal network supporting pervasive services. Acta Electronica Sinica, 2007,35(4):599−606 (in Chinese with English abstract).

[58] Stanford Networked Systems Group. OpenRadio. 2012. http://snsg.stanford.edu/projects/openradio/

[59] Bansal M, Mehlman J, Katti S, Levis P. Openradio: A programmable wireless dataplane. In: Proc. of the 1st ACM SIGCOMM Workshop on Hot Topics in Software Defined Networks (hotSDN). Helsinki, 2012. 109−114. [doi: 10.1145/2342441.2342464]

[60] Gudipati A, Perry D, Li LE, Katti S. SoftRAN: Software defined radio access network. In: Proc. of the 2nd ACM SIGCOMM Workshop on Hot Topics in Software Defined Networking (hotSDN). Hong Kong, 2013. 25−30. [doi: 10.1145/2491185.2491207]

[61] Suresh L, Schulz-Zander J, Merz R, Feldmann A, Vazao T. Towards programmable enterprise WLANs with Odin. In: Proc. of the 1st ACM SIGCOMM Workshop on Hot Topics in Software Defined Networks (hotSDN). Helsinki, 2012. 115−120. [doi: 10.1145/2342441.2342465]

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

[62] Yap KK, Kobayashi M, Sherwood R, Huang TY, Chan M, Handigol N, McKeown N. OpenRoads: Empowering research in mobile networks. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2010,40(1):125−126. [doi: 10.1145/1672308.1672331]

[63] Ren FY, Huang HN, Lin C. Wireless sensor network. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2003,14(7):1282−1291 (in Chinese with English abstract). http://www.jos.org.cn/1000-9825/14/1282.htm

[64] Uddin MF, Assi C. Joint routing and scheduling in WMNs with variable-width spectrum allocation. IEEE Trans. on Mobile Computing, 2013,12(11):2178−2192. [doi: 10.1109/TMC.2012.187]

附中文参考文献:

[45] 陈剑,吴建平,李贺武.基于用户分配和负载的频谱分配算法.软件学报,2013,24(7):1638−1649. http://www.jos.org.cn/1000-9825/4312.htm [doi: 10.3724/SP.J.1001.2013.04312]

[55] 尤肖虎,王京,张平,李少谦,朱近康.对绿色无线移动通信技术的研究和思考.中国科学技术大学学报,2009,10:1009−1015.

[57] 董平,秦雅娟,张宏科.支持普适服务的一体化网络研究.电子学报,2007,35(4):599−606.

[63] 任丰原,黄海宁,林闯.无线传感器网络.软件学报,2003,14(7):1282−1291. http://www.jos.org.cn/1000-9825/14/1282.htm

孙文琦(1989－),女,内蒙古赤峰人,博士生,CCF 学生会员,主要研究领域为下一代互联网,无线网络资源管理.

李贺武(1974－),男,博士,副研究员,主要研究领域为下一代无线网络,无线网络资源管理,移动应用.

吴建平(1953－),男,博士,教授,博士生导师,CCF 会士,主要研究领域为下一代互联网,计算机网络体系结构,网络协议测试.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn