

# 多用户协同通信与感知技术

2

罗涛,郝建军,乐光新  
(北京邮电大学,北京 100876)

**[编者按]** 协同通信技术和感知无线电技术是近年来的研究热点,已受到广泛关注。协同通信技术可提高系统的传输能力,感知无线电技术可提高频谱的使用效率,两者的结合将会对未来的无线移动通信系统带来重大影响。本讲座分3期:第1期介绍了协同通信技术提出的背景、协作方式及关键技术;第2期将介绍感知无线电技术的基本概念、关键技术及相关标准;第3期将探讨两种技术的有效结合方式及它们对现代无线通信产生的重大影响。

中图分类号:TN911 文献标识码:A 文章编号:1009-6868 (2009) 02-0060-05

## 2 感知无线电技术

随着无线通信技术的飞速发展,无线局域网(WLAN)技术、个域网络(WPAN)和城域网(WMAN)技术迅猛发展,无线频谱日益拥挤,特别是传输损耗小、适合于远距离传输、大范围覆盖的3 GHz以下频段更为拥挤。因此,无线频谱资源已成为制约未来无线通信发展的主要瓶颈。然而,现有无线通信系统采用的都是频谱的固定分配方案,这些已被分配的频谱资源却并未得到充分使用,大都在时间和空间上存在不同程度的闲置。美国联邦通信委员会(FCC)2003年底的调查可以验证这一点:目前已分配的频段利用率在15%~85%之间不等,某些频段如移动手机网络的频段是超负荷的,但是诸如业余无线电等相当多频段并没有得到充分使用。因此,针对目前这种频谱固定分配方式下频谱使用效率不高的现状,人们提出采用感知无线电(CR)技术,用户根据实时感知的环境状况,充分利用那些在时间或者空间上空闲的频谱

资源,有望解决频谱资源问题。本讲主要讨论感知无线电技术的发展历史与研究现状、基本概念、主要功能、关键技术及相关标准。

### 2.1 CR发展历史与研究现状

感知无线电这一概念首先由Joseph Mitola博士于1999年提出。由于CR技术对现存的无线频谱固定分配制度提出了挑战,故CR刚一面世就被引起广泛的关注和重视。后来,一些频谱管制部门如FCC和各国的相关频率管理部门等都对CR给予了足够的支持。2002年12月,FCC指出非授权设备应具备能够识别未占用频段的能力;2003年11月,FCC提出新的量化和管理干扰的指标值——干扰温度的概念,以扩展移动和卫星频段的非授权操作;同年12月FCC成立了CR工作组,明确表示支持CR并修正美国的《电波法》;2004年5月,FCC又建议非授权无线电系统可在电视广播频段内进行工作。

当然,CR技术同时也引起了学术界和产业界的广泛关注,许多著名的学者及研究机构都投入到CR的研究中,并且已启动了许多重要项目,如:德国Karlsruhe大学Timo A Weiss等教授

提出的Spectrum Pooling系统、美国乔治亚理工大学Ian F Akyildiz等教授提出的OCRA系统、加州大学的CORVUS系统和Nautilus系统、维吉尼亚理工大学的CR系统、Peiman等人提出的CMT CR系统、W Xiang等人提出的FMT CR系统、美国军方DARPA的XG项目、欧盟的E2R项目等。在这些项目的驱动下,CR技术已经在基本理论、关键技术、与现有网络的共存等方面取得了一些成果。为了及时交流研究成果,美国电气电子工程师学会(IEEE)为此还专门组织了两个重要的国际年会:IEEE CrownCom和IEEE DySPAN。此外,许多重要的国际学术期刊也纷纷于近期刊发有关CR的专辑。在中国,国家自然科学基金委员会、科技部等一些部门也于近几年相继批准投资了若干与CR有关的基金、“863”计划项目等,一批高等院校等也都已相继开展CR方面的研究工作。

### 2.2 CR基本概念

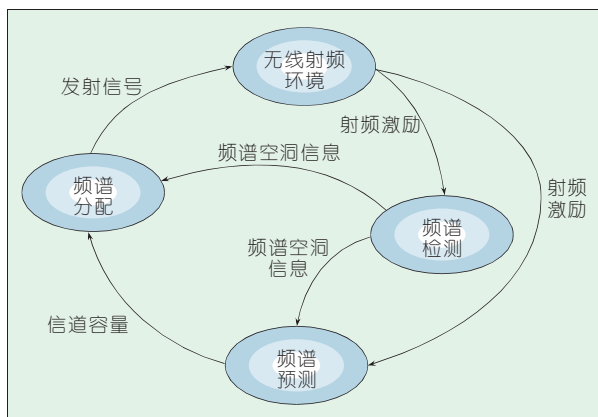
Mitola在他的博士论文中这样描述感知无线电:无线数字设备及网络在无线电资源和通信方面具有充分的智能性,可探测用户的通信需求,并据此来提供最适合的无线电资源和无线业务。他给出了一个主要的应用层的,以对通信环境的检测为基础的感知圈模型。图8给出了一种注重频谱处理的基本感知圈模型。随后,不同机构和学者分别从不同的角度给出了CR的定义。其中,比较有代表性的有:FCC认为“CR是能够基于对其工作环境的交互可改变发射机参数的无线电技术”;Simon Haykin则从信号处理的角度给出了另外一种定义,他认为“CR是一个智能无线通信系统,它能够感知外界环境,并使用人工智能技术从环境中学习,通过实时改变某些操作参数,如载波频率、调制技术、发送功率等,使其内部状态适应接收到的无线信号的统计性变化,以便充分使用频谱资源,达到可在任何时间任何地点进行高可靠

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(60872049);高等学校博士学科点专项科研基金资助课题(20050013005)

60

中兴通讯技术

2009年4月 第15卷第2期 Apr. 2009 Vol.15 No.2



▲图8 感知圈模型

性通信的目的。”

实际上,无论上述那种定义,CR至少应该都具有对所处周边环境的实时感知能力和对通信系统参数的重新配置能力。感知能力能够使系统与周围环境进行交互活动,进而选择合理的通信参数来适应环境;重新配置能力能够使系统在不改变任何硬件部分的前提下自适应地完成发射载频、功率以及调制等通信参数的改变。从感知方面看,CR是一个信号处理和机器学习的过程;而从重新配置方面看,CR更像是使用软件无线电技术来执行通过感知能力而获得的任务。

### 2.3 主要功能

根据定义易知,CR的最终目标是通过感知能力获得最佳可用频谱,并通过重新配置能力去使用之,从而提高无线频谱的使用效率。由于目前大多数频谱已经被固定分配,因此最大的挑战就是如何与授权用户共享这些频谱而不对其产生干扰。图9描述了CR是如何动态地利用那些暂时没有使用的频谱,通常称其为频谱空洞或空白频谱(至少在空间、时间、频率任一自由度上是空闲的)。如果这一频段随后被授权用户使用了,那么感知用户或转移到另外一个频谱空洞,或继续使用该频段,但此时要改变它的传输功率与调制方法以避免对授权用户产生干扰,这样就可以实

现动态频谱接入(DSA)。图9中,实线箭头给出了一种可能的动态谱接入方案。由此可见,CR的主要功能可概括为:频谱感知、频谱管理、频谱共享和参数调整几个方面。

- 频谱感知: 检测频谱空洞,当感知用户工作在授权频段时检测授权用户的出现;

- 频谱管理: 根据感知用户的QoS需求选择最佳的可用信道;

- 频谱共享: 与其他用户协调接入信道,即多用户多址及资源分配;

- 参数调整: 自适应地改变通信参数以尽可能地适应环境的变化。

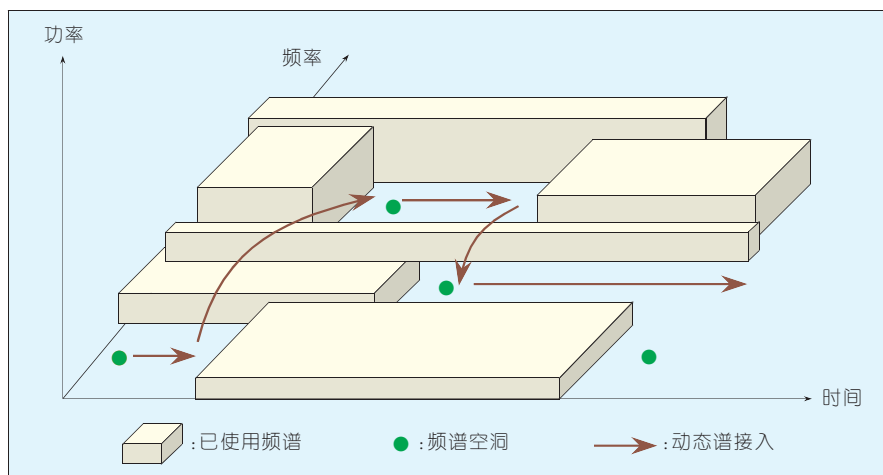
#### 2.3.1 频谱感知

CR通信技术的一个重要前提就是频谱感知能力,即设备如何及时获取频谱空洞,这也是CR应用的基础和前提。为了不对授权用户(LU)造成干扰,感知用户(CU)在利用频谱空洞进行通信的过程中,需要能够快速感知到LU的再次出现,并迅速规避相应频段,或在LU干扰门限之下继续通信。这就要求CU应具有高可靠性的频谱感知功能,且能够实时地连续侦听频谱。目前,传统的频谱感知技术

可分为单节点和基于干扰的检测两大类。单节点感知是指单个CR节点根据本地的无线射频环境单独进行频谱特性标识,主要包括匹配滤波检测、能量检测和循环平稳特征检测等算法。基于干扰的频谱检测算法要求实时检测授权用户的干扰水平,寻求使其不超过FCC所定义的干扰温度的频谱。但该方法通常要求CR节点知道授权用户的位置及相关信息,目前尚面临很多问题。事实上,无论上述哪一种频谱感知算法的效果都不是特别理想,尤其是遭受到严重衰落或授权用户以小功率发送信号等情况时,感知用户均很难做到准确检测,从而导致对授权用户的严重干扰。因此,人们提出了协作频谱检测算法:它通过数据融合,利用多个节点的感知结果进行综合判决。协作检测算法不仅降低了对单个检测节点的要求,减轻了其负担,而且提高了对微弱信号的准确检测,这等效于扩大了CU频谱感知的地理范围,从而有可能更进一步地提高频谱的使用效率。但协作检测算法需要有协作伙伴的参与,且实现要复杂一些。

#### 2.3.2 频谱管理

CR通信系统中,通过频谱感知功能探测到的未被使用的频谱空洞可能分散在包括授权频段和非授权频段的很宽的频率范围内,它们在空时



▲图9 频谱空洞

频维度上也存在不同的差异,如具有不同的中心频率、带宽等动态特征,可供使用的时间也可能不同等。由于CR技术需要在所有可用的频段中判决出条件最好的分配给最需要的用户,以满足不同用户的各种QoS要求。因此它需要具备频谱管理的功能。频谱管理是在频谱感知的基础上进行频谱分析和频谱判决,即根据CU用户的QoS需求和授权用户的干扰限制,在检测到的频谱空洞中选择出最佳信道。频谱分析的目的在于归纳可用频谱空洞的频谱特性,以便作出最符合用户要求的判决;而频谱判决指CR应该根据用户的传输速率、可接受的误码率、最大延迟、传输模式和传输带宽等QoS,为当前的传输选择最合适的运行频段。然而,与固定频谱分配方式不同,CR系统中的用户是一种动态频谱分配方式:当信道状态发生变化或更高优先级的用户接入当前通信频段时,就需要及时进行规避或者通过频谱切换跳转到另一个空闲频点上继续进行通信,也称之为频谱的移动性管理,即链路维持和频谱切换。在CR用户的可用信道列表中可能存在多个可用频谱,故频谱移动性处理需要设计快速频谱选择算法和快速频谱切换算法。频谱选择算法根据可用频谱的信道特性和业务的需求可为用户选择通信频谱,优化整个系统的频谱利用率。频谱切换算法应该保证上层业务在切换中尽可能地不受影响,可分为初始化、判决和切换3个阶段。

### 2.3.3 频谱共享

在感知无线电系统中,开放频谱的一个重要挑战就是频谱共享。如果说频谱感知主要涉及物理层,频谱管理与上层业务关系较为密切的话,那么CR中的频谱共享问题就如同现有通信系统中MAC层的多用户多址及资源分配技术。CU与LU的共存及可用带宽的非集中式管理问题等都是频谱共享中的主要问题。

基于网络结构,频谱共享技术可分为集中式与非集中式(即分布式)两种。所谓集中式是指网络中的各节点(即各用户)都把自己的频谱检测信息汇聚到集中控制单元,由控制单元绘制出频谱分配映射图;而分布式则是指各个分布式节点都参与频谱分配,频谱接入是由各节点自己决定的。基于频谱分配行为,频谱共享技术可分为合作式与非合作式。合作式是指每个节点都会与其他节点分享自己对周围环境感知的结果,频谱分配算法中也会考虑所有这些信息;而非合作式则是指各节点仅仅考虑自己的行为,即认为各节点是“自私的”。基于接入技术,频谱共享技术又可分为填充式(Overlay)与共享式(Underlay)两种。Overlay是指一个CU利用未被使用的频谱空洞接入网络,其实就是频谱在LU和CU之间的一种时分复用,当然这种情况下对LU的干扰也最小;而Underlay则是指CU可使用CDMA及UWB等扩频技术与LU共享同一频段。Underlay情况下,LU将CU的信号看作噪声(实际上就是干扰温度的概念),需要仔细设计。显然,当感知用户已知授权系统的全部信息时,Overlay方式的性能要优于Underlay方式;而当无法获得授权系统的相关信息时,Underlay方式的性能要好一些。采用CR技术实现频谱共享的前提是必须保证LU通信的可靠顺畅进行,即保证CU对LU造成的干扰始终处于干扰温度限之下。分布式网络结构中,CU的功率分配是造成干扰的主要原因,因此探索适用于CR技术的分布式功率控制方案是非常重要的问题。

### 2.3.4 参数调整

为了适应周边不断变化的无线环境,CR系统需要根据频谱感知、管理和分配的结果来实时调整自己的通信参数,而不是外部设定,因此CR系统的自我配置能力是相当重要的。从这个意义上说,CR是一种智能通信系统。一般地,CR系统可调整的通

信参数主要有:

- 工作频段:基于周边无线环境实时选择最优频段进行通信,自适应地在频谱空洞间进行频谱切换。

- 传输功率:在允许的范围内进行动态发射功率调整,尽可能地降低RU和LU之间及RU之间的相互干扰,保证通信顺畅进行。

- 编码、调制方式:实时调整信道编码、调制方式,尽可能地适当前频谱空洞的传输特性,满足用户的QoS需求。如,对于实时性语音业务,数据传输速率比差错率更重要,可以选择具有高效率的信道编码方式和多进制调制方式。

- 通信系统:通信环境变化时,CR甚至需要在不同的通信系统之间进行切换。

事实上,CR通信系统的上述几个主要功能之间常常是很难严格界定的,它们之间动态相互交融,更像是一个整体。

## 2.4 CR关键技术

虽然感知无线电技术的研究已取得很多成果,但仍有不少问题需要进一步探讨和研究。目前,感知无线电关键技术的研究主要包括:

### (1) 频谱感知及分配技术

频谱感知是CR技术的基础和前提,自适应频谱分配技术可充分使用已检测到的空闲频谱,提高无线频谱的使用效率。研究热点主要有:准确度高度的频谱检测算法,尤其是低信噪比下的算法,如协作频谱检测算法、基于循环功率谱特征的检测算法等;自适应频谱分配/用户接入算法:基于预测的频谱分配算法,基于图论的频谱分配算法,基于定价拍卖的频谱分配算法,基于博弈论的感知频谱共享算法;传输频谱空洞信息和控制信息的公共信道的建立算法等。

### (2) 干扰消除技术

感知无线电系统中,干扰主要包括RU用户对LU用户的干扰,RU用户之间的干扰,LU用户对RU用户之间



的干扰等几大类。为了保证LU用户的业务质量,要求RU对LU的干扰必须处在低于干扰温度的范围内。目前,研究热点主要有选用合适的波束成形脉冲、采用加窗方法等降低正交频分复用(OFDM)频谱的带外泄露,选用准确度高的频谱检测算法,选用避免冲突的频谱分配算法等。

### (3)多载波调制技术

多载波调制(MCM)技术将多用户的接入与子载波的分配算法相关联,利用DFT易于实现,故目前的CR系统大都基于MCM构建。MCM主要包括OFDM和滤波器多音调制(FMT)等实现方式。CR系统中,OFDM虽较FMT易于实现,但对频率同步要求高,旁瓣泄露大,对LU用户的干扰较严重。FMT由于使用了滤波器组,虽实现复杂一些,但干扰小。因此,综合考虑互干扰消除、对同步的敏感程度及传输效率时,FMT技术更具优势。

### (4)网络拓扑

在CR系统中存在有两个系统:由LU用户组成的授权系统和由RU用户组成的感知系统。它们既相互独立,又有联系。一般而言,授权系统的拓扑结构已经确定,感知系统既可采用具有中心节点的系统,也可采用无中心节点的Ad Hoc系统。目前对具有中心节点系统的研究较多,由于复杂度等原因对Ad Hoc系统的研究还较少。

### (5)与其他技术的结合

协同通信技术可与许多技术相结合,发挥各自的技术优势,提高系统传输能力。例如,前面提到的与协同通信技术的结合,可在提高传输性能的同时尽可能地提高频谱的使用效率;与信道编码技术的结合可进一步提高系统对抗无线信道衰落的能力;与多载波技术的结合可在对抗频谱选择性的同时增加CR系统用户接入的灵活性,并且简化算法等。

## 2.5 相关国际标准

在频谱政策管理部门的带动下,一些标准化组织接纳了CR技术并先

后制定了一系列标准以推动该技术的发展。目前涉及CR标准制订的组织和行业主要有IEEE和国际电信联盟(ITU)等。下面主要介绍IEEE目前正在制订的与CR有关的标准,主要有:IEEE 802.22、IEEE 802.16h、IEEE SCC41/IEEE P1900、IEEE 802.11h以及IEEE 802.11y等。

### (1)IEEE 802.22标准

IEEE于2004年10月正式成立802.22工作组,其第1版草案标准于2006年底通过。IEEE 802.22是把CR技术由概念变成现实的首个标准,也是目前较为完善的全球第一个关于CR技术的空中接口标准,它对CR技术的演进和发展具有重要意义。IEEE 802.22也被称为无线区域网络(WRAN),系统工作频率为54 MHz~862 MHz(可扩展到41 MHz~910 MHz)的VHF/UHF电视频段,专门研究在不干扰现存电视频段的情况下,如何充分利用该频段进行无线通信,制定其物理层和MAC层空中接口标准。为了与各种电视标准兼容,它的信道带宽包括6 MHz、7 MHz和8 MHz三种。

IEEE 802.22系统定义了一个固定点对多点的无线空中接口,必须由一个基站和至少一个感知用户构成。基站负责管理整个小区和相关的感知用户终端。除了传统的基站功能之外,802.22系统的基站还必须具有分布感知的能力,即能够指导用户设备对不同的信道进行分布式的测量工作。然后,BS根据收到的反馈信息和自己感知到的信息决定下一步的行动,如改变发射频率、发射功率等传输传输,以避免对电视频段的各种法定授权业务等造成干扰。与IEEE 802系列的其他标准相比,802.22系统是针对无线区域网的。由于800 MHz以下电视频段的传播特性好,因此,可以说802.22系统是目前覆盖范围最大的无线通信系统。若基站功率不受限制的话,其覆盖范围的半径可达100 km,即使在目前标准给出的有效全向辐射功率(EIRP)为4 W

时,覆盖半径也可达到33 km。802.22系统的频谱利用率处于每赫兹0.5~5 b/s之间,若按平均值3 b/s来计算的话,6 MHz带宽的信道容量就可达到18 Mb/s。

IEEE 802.22标准中,上下行的物理层均采用OFDM调制技术。考虑到传播时延大约在25  $\mu$ s~50  $\mu$ s范围内,正交频分多址接入(OFDMA)系统选用2 048个子载波数,40  $\mu$ s左右的循环前缀。OFDMA多址接入技术可以方便地实现子载波分配,整合使用物理上并不连续的频率空洞资源,为感知无线电高效利用频谱资源提供了可能。结合自适应编码调制技术,OFDM系统可根据信道的实际情况动态地调整带宽、调制编码方式等,易于满足不同用户的不同服务质量需求,为其提供灵活的服务。与系统提供的QPSK、16QAM、64QAM等调制技术以及1/2、3/4、2/3卷积码结合,可以实现从每个子载波几Kb/s到每个电视频道19 Mb/s的速率。初步的链路预算表明,仅采用一个完整的电视信道进行数据传输还满足不了802.22的传输要求,因此系统还提出使用信道合并的解决方案,即将多个电视信道进行捆绑。信道合并有合并相邻信道和合并不相邻信道两种方案,分别称为信道接合和信道聚合。需要说明的是,目前的信道接合方案均采用固定载波间隔进行,即捆绑两个电视信道时采用2×2 048个子载波数的OFDMA系统,3个时采用3×2 048等。

IEEE 802.22标准的系统及物理层的一些主要参数分别如表2和表3所示。

### (2)IEEE 802.16h标准

1999年,IEEE成立了IEEE 802.16工作组专门开发宽带固定无线技术标准(WiMAX),目标就是建立一个全球统一的宽带无线接入标准。但是,随着IEEE 802.16系列规范的不间断制订和完善,频谱资源问题成为制约其发展的关键问题。为此,2004年12月,专门成立了致力于解决共存问题的

▼表2 IEEE 802.22标准的主要系统参数

参数名称	参数取值
射频单信道带宽/MHz	6/7/8
每赫兹平均频谱效率/(b/s)	3(0.5~5)
平均信道容量/(Mb/s)	18/21/24
多址方式	正交频分多址接入
双工方式	时分双工
WRAN基站的EIRP	4 W
WRAN系统的覆盖半径/km	33
EIRP:有效全向辐射功率	WRAN:无线区域网络

IEEE 802.16h工作组。IEEE 802.16h标准的主要思路是:在IEEE 802.16标准制定的QoS的要求下,利用感知无线电技术让多个系统共用资源,以确保基于IEEE 802.16的免授权系统之间的共存以及与授权系统之间的共存。

### (3)IEEE SCC41/IEEE 1900标准

2005年,IEEE成立了IEEE 1900工作组,主要进行与下一代无线通信技术和高级频谱管理技术相关的电磁兼容的研究。该工作组对于感知无线电技术的发展及其与其他无线通信系统的协调和共存有着极其重要的意义。IEEE 1900包括IEEE 1900.1、IEEE 1900.2、IEEE 1900.3和IEEE 1900.4四个工作组。后来2007年IEEE 1900工作组被更名为“IEEE SCC41/DySPAN”(IEEE Standards Coordinating Committee / Dynamic Spectrum Access Networks)工作组,主要致力于下一代宽带无线通信系统中的高级频谱管理技术研究,开始考虑商用开发,如感知无线电、动态谱接入等。IEEE SCC41将IEEE 1900原来的4个工作组扩展为6个工作组1900.1~6。IEEE 1900.1的任务是解释和定义有关下一代无线电系统和频谱管理的术语和概念;IEEE 1900.2工作组主要为干

扰和共存分析提供操作规程建议,提供分析各种无线服务共存和互相间干扰的技术指导方针;IEEE 1900.3主要为软件无线电的软件模块提供一致性评估的操作规程建议;IEEE 1900.4定义了网络资源管理和设备资源管理模块,以及模块之间需要交互的信息。这些模块使得在异构无线接入网中,通过在网络与设备之间的协商来优化无线资源分配和动态频谱接入,以改进系统容量和服务质量。IEEE 1900.5的主要任务是定义一整套在不同厂商的兼容设备间进行互操作的策略原语,用于描述动态频谱接入等功能;IEEE 1900.6的主要任务是定义一个用于无线系统中,信道感知模块与其他模块之间的可扩展的接口框架和数据结构,它不依赖于任何一种具体的无线技术,使得今后出现的其他无线技术仍然能够继续使用。IEEE 1900.1和IEEE 1900.2已于2008年发布。

### (4)IEEE 802.11h标准

IEEE 802.11h标准最初源于欧洲5 GHz频段的频谱管理和发射功率控制协议。其实,在欧洲的无线局域网HIPERLAN和IEEE 802.11a标准所使用的5 GHz频段中还存在其他设备,如雷达。因此,为了保证无线局域网不受到这类设备的干扰是困难的。基于此,为了使IEEE 802.11a无线电能检测到这类雷达信号并避免对他们形成干扰,IEEE 802.11工作组制订和发布了IEEE 802.11h标准,作为IEEE 802.11的媒体接入控制和物理层规范的扩展协议,现在已被许多国家采用。IEEE 802.11h协议修改了IEEE

802.11a物理层标准,增强了5 GHz频段的网络管理、动态频谱管理和发射功率控制,提高了信道能量检测和报告、多个管理域的信道覆盖、动态信道选择和传输功率控制机制等。

### (5)IEEE 802.11y标准

2005年7月,FCC开放了用于固定卫星服务网络的3.65~3.7 GHz频段。IEEE 802.11y标准正是基于此频段开发,规范在此频段上进行的无线局域网通信的机制,避免对该频段中的其他通信用户带来干扰。IEEE 802.11y标准定义了传输初始化的过程,确定信道使用状况的方法,检测到信道忙时的重传机制等内容。IEEE 802.11y使用5 MHz、10 MHz、20 MHz等多种带宽和OFDM多载波调制技术。借助OFDM技术的子载波分配等特点,它可实现多种带宽间的快速调整和灵活切换,从而避开授权用户的工作频段,降低对授权用户的干扰,提高系统的鲁棒性和灵活性。

(待续)

收稿日期:2009-01-21

## 作者简介



罗涛,博士,北京邮电大学副教授。先后承担和参与国家“863”、自然科学基金项目及企业合作项目多项。主要研究方向包括感知无线电、协同通信、MIMO、OFDM、高速无线网络体系结构等。发表论文30余篇。



郝建军,博士,北京邮电大学副教授。主要研究方向包括感知无线电技术、网络编码及协同通信技术等。发表论文10余篇。



乐光新,北京邮电大学教授、博士生导师。主要研究方向包括数字通信与信息处理、宽带无线通信与无线IP网等。已发表论文百余篇。

▼表3 IEEE 802.22标准物理层OFDM的主要参数

单信道带宽/MHz	子载波间隔/Hz	FFT周期/ $\mu$ s	子载波总数/保护间隔	数据+导频子载波数	信号带宽/MHz
6	3 348	298.666	2 048/320	1 536+192	5.785
7	3 906	256.00	2 048/320	1 536+192	6.750
8	4 464	224.00	2 048/320	1 536+192	7.714
OFDM:正交频分复用					