

认知无线网络中频谱感知与动态分配策略研究

张琳琳

成都博纳神梭科技发展有限公司河北分公司 河北 石家庄 050081

摘要: 随着无线通信技术的迅猛发展, 频谱资源日益紧张, 认知无线网络作为一种有效提高频谱利用率的新兴技术应运而生。频谱感知与动态分配是认知无线网络的核心关键技术, 直接关系到网络的性能和频谱资源的利用效率。本文深入探讨了认知无线网络中频谱感知与动态分配策略的相关问题, 旨在为认知无线网络的进一步发展和应用提供理论支持和实践指导。

关键词: 认知无线网络; 频谱感知; 动态分配策略; 频谱利用率

1 引言

无线通信技术发展使人们对无线服务需求大增, 无线设备数量急剧膨胀, 据市场研究机构Statista统计, 截至2023年全球移动设备超150亿台且持续增长。但现有固定频谱分配政策致资源利用不均衡, 大部分授权频段常闲置, 部分非授权频段拥挤, 美国FCC研究显示已分配频谱利用率差异大, 某些频段时段利用率低于15%。这种现状催生了认知无线网络, 它能让未授权用户在不影响授权用户的情况下, 动态接入授权频段, 实现频谱二次利用, 提高利用率。频谱感知技术是“眼睛”, 可感知频谱环境; 动态分配策略是“大脑”, 能合理分配空闲频谱, 故研究二者对缓解频谱紧张、推动无线通信发展意义重大。

2 认知无线网络概述

2.1 认知无线电的定义与特点

认知无线电是一种智能的无线通信系统, 它就像一个具有高度感知和适应能力的“通信精灵”, 能够感知周围无线环境的变化, 并通过实时调整自身的传输参数(如频率、功率、调制方式等)来适应环境变化, 实现高效、可靠的通信。它具有以下几个显著特点:(1) 认知能力: 能够对周围的无线环境进行全面、细致的感知和分析, 获取频谱使用情况、信道质量、干扰水平等关键信息。例如, 它可以检测到某个频段在特定时间段内的信号强度、噪声水平以及主用户的活动情况。(2) 重构能力: 根据感知到的环境信息, 动态调整自身的传输参数, 以适应不同的频谱环境和通信需求。比如, 当检测到某个频段干扰较大时, 它可以自动调整发射功率或切换到其他空闲频段^[1]。(3) 自适应性: 可以自动学习和优化自身的行为, 不断提高频谱利用效率和通信性能。通过不断积累经验, 它能够预测频谱环境的变化趋势, 提前做出调整, 以实现更高效的通信。

2.2 认知无线网络的结构与工作原理

认知无线网络由主用户、认知用户和认知基站构成。主用户是授权频段“合法居民”, 通信有优先权; 认知用户是“访客”, 需借频谱感知找空闲频谱通信; 认知基站如“交通警察”, 管理接入与频谱分配。其工作原理基于频谱感知、决策、分配和共享技术。认知用户先通过频谱感知, 如用能量检测法扫描2.4GHz频段, 能量低于预设门限则判定空闲。再依据感知结果频谱决策选合适频段, 接着用频谱分配策略, 如基于图论将用户和频段作顶点和边, 找最优匹配分配。最后认知用户频谱共享协同通信, 且不干扰主用户。

3 频谱感知技术研究

3.1 频谱感知的主要方法

3.1.1 能量检测法

能量检测法是一种简单常用的频谱感知方法, 其基本原理是通过检测接收信号的能量来判断频段是否被占用。就像我们通过听声音的大小来判断房间里是否有人一样, 当接收信号的能量超过某个预设的门限值时, 认为该频段被占用; 反之, 则认为该频段空闲。能量检测法的优点是实现简单、计算复杂度低, 不需要知道主用户的先验信息。例如, 在一个简单的认知无线电系统中, 只需要对接收信号进行平方运算和积分处理, 就可以得到信号的能量。然而, 该方法容易受到噪声不确定性的影响, 在低信噪比环境下性能较差。实验表明, 当信噪比低于-10dB时, 能量检测法的检测概率会急剧下降。比如, 在噪声功率波动较大的工业环境中, 能量检测法可能会将空闲频段误判为占用频段, 或者将占用频段误判为空闲频段。

3.1.2 匹配滤波器检测法

匹配滤波器检测法是一种最优的信号检测方法, 它通过将接收信号与已知的主用户信号进行相关运算, 当

相关值超过门限值时,判断主用户存在。就像我们用一个特定的钥匙去开一把锁,只有匹配时才能打开。匹配滤波器检测法的优点是在已知主用户信号特征的情况下,能够在短时间内获得较高的检测概率。例如,在已知主用户采用QPSK调制方式、码序列为特定序列的情况下,匹配滤波器可以快速准确地检测到主用户信号。但是,该方法需要知道主用户的精确信号特征,如调制方式、码序列等,在实际应用中具有一定的局限性。因为在实际通信环境中,主用户的信号特征可能会发生变化,而且获取主用户的精确信号特征往往比较困难。

3.1.3 循环平稳特征检测法

循环平稳特征检测法利用了调制信号的循环平稳特性进行频谱感知。由于大多数通信信号都具有循环平稳性,而噪声通常是平稳的,因此可以通过检测信号的循环平稳特征来区分信号和噪声。就像我们可以通过观察一个物体的运动规律来判断它是机器还是自然物体一样。循环平稳特征检测法的优点是能够在低信噪比环境下有效检测主用户信号,并且对噪声不确定性具有一定的鲁棒性^[2]。实验结果显示,在信噪比低至-15dB时,循环平稳特征检测法仍然能够保持较高的检测概率。但是,该方法的计算复杂度较高,实现难度较大。它需要对信号进行复杂的循环谱分析,涉及到大量的矩阵运算和傅里叶变换。

3.2 频谱感知面临的挑战

3.2.1 噪声不确定性

噪声不确定性是频谱感知中面临的一个重要问题,它会导致能量检测法的性能下降。在实际环境中,噪声功率可能会随着时间和环境的变化而波动,使得预设的门限值无法准确判断信号是否存在。就像我们在不同的房间里听声音,由于房间的背景噪声不同,我们需要调整判断声音大小的标准。为了解决噪声不确定性问题,研究人员提出了一些改进方法,如动态门限调整、多门限检测等。动态门限调整方法可以根据噪声功率的变化实时调整检测门限,例如,通过实时监测噪声功率,并根据噪声功率的估计值动态调整门限值。多门限检测方法则设置多个门限值,根据不同的门限值进行综合判断,提高检测的准确性。

3.2.2 隐藏终端问题

隐藏终端问题是指由于障碍物的遮挡或距离较远等原因,认知用户无法感知到主用户的存在,从而错误地认为频段空闲并进行接入,导致对主用户造成干扰。就像在一个大型商场里,由于墙壁的遮挡,我们可能看不到某个角落里的人,从而误以为那个区域没有人。解决

隐藏终端问题的方法包括增加感知节点的数量、采用协作频谱感知技术等。增加感知节点可以扩大感知范围,提高发现主用户的概率。例如,在一个复杂的城市环境中,部署多个感知节点可以覆盖更多的区域,减少隐藏终端的发生。协作频谱感知技术通过多个认知用户之间的信息共享和协同处理,可以提高频谱感知的准确性和可靠性。

3.2.3 多径衰落

多径衰落会使接收信号的幅度和相位发生随机变化,影响频谱感知的准确性。就像我们在山区打电话,信号可能会经过多次反射和折射,导致信号强度忽大忽小。为了克服多径衰落的影响,可以采用分集接收技术、自适应均衡技术等。分集接收技术通过多个天线接收信号,并将这些信号进行合并处理,提高接收信号的质量。自适应均衡技术则可以根据信道的变化自动调整均衡器的参数,消除多径衰落引起的码间干扰。

3.3 协作频谱感知技术

协作频谱感知技术通过多个认知用户之间的信息共享和协同处理,可以提高频谱感知的准确性和可靠性。就像一群人一起观察一个事物,比一个人观察更准确可靠。协作频谱感知可以分为集中式协作和分布式协作两种方式。

3.3.1 集中式协作频谱感知

在集中式协作频谱感知中,各个认知用户将本地感知结果发送到认知基站,由认知基站进行融合处理,做出最终的频谱决策。就像学生们把作业交给老师,老师进行批改和总结。集中式协作频谱感知的优点是能够充分利用各个认知用户的感知信息,提高检测性能。例如,在一个大型的认知无线网络中,认知基站可以收集多个认知用户的感知数据,通过数据融合算法进行综合判断,从而提高频谱感知的准确性。但是,该方法需要大量的通信开销来传输感知数据,并且对认知基站的计算能力要求较高。

3.3.2 分布式协作频谱感知

分布式协作频谱感知中,认知用户之间通过相互交换感知信息进行协同决策,不需要认知基站的参与。就像同学们之间互相交流作业答案,共同完成学习任务。分布式协作频谱感知的优点是减少了通信开销,提高了系统的灵活性和可靠性。例如,在一些没有中心节点的分布式认知无线网络中,认知用户可以通过无线通信协议相互交换感知信息,自主地进行频谱决策。但是,该方法需要设计有效的信息交换和决策算法,以确保各个认知用户能够达成一致的频谱决策。

4 动态分配策略研究

4.1 动态分配策略的目标与原则

动态分配策略的目标是在满足主用户通信需求的前提下,最大化认知用户的频谱利用率和系统整体性能。就像在分配资源时,既要保证重要任务的顺利进行,又要充分利用剩余资源提高整体效率。为了实现这一目标,动态分配策略应遵循以下原则:(1)公平性原则:确保各个认知用户能够公平地获得频谱资源,避免出现某些用户长期占用频谱而其他用户无法接入的情况。就像在分配食物时,要保证每个人都能得到一份。例如,在一个多用户认知无线网络中,采用轮询的方式让每个认知用户都有机会接入频谱^[3]。(2)高效性原则:根据认知用户的需求和频谱环境的变化,动态地调整频谱分配方案,提高频谱利用效率。就像根据交通流量实时调整信号灯的时间,以提高道路的通行效率。例如,当某个认知用户需要传输大量数据时,为其分配更多的频谱资源。(3)干扰最小化原则:在频谱分配过程中,要尽量避免认知用户对主用户造成干扰,保证主用户的正常通信。就像在施工时,要避免影响周围居民的正常生活。例如,通过设置干扰保护门限,当认知用户的发射功率可能导致对主用户的干扰超过门限时,限制其发射功率。

4.2 常见的动态分配策略

4.2.1 基于图论的分配策略

基于图论的分配策略将频谱分配问题抽象为一个图论问题,其中认知用户和频段分别表示为图中的顶点和边,通过寻找图中的最优匹配来实现频谱分配。就像在一个社交网络中,将人和活动分别表示为节点和边,通过匹配算法为每个人安排合适的活动。该方法的优点是能够直观地描述频谱分配问题,并且可以利用图论中的成熟算法进行求解。例如,采用匈牙利算法可以快速找到图中的最优匹配,实现频谱的高效分配。但是,基于图论的分配策略在处理大规模网络时,计算复杂度较高。随着认知用户和频段数量的增加,图的规模会迅速增大,导致算法的运行时间变长。

4.2.2 基于拍卖理论的分配策略

基于拍卖理论的分配策略将频谱资源看作拍卖品,认知用户作为竞拍者,通过竞价的方式获得频谱使用权。就像在拍卖会上,买家通过出价竞争拍品。该方法的优点是能够激励认知用户合理使用频谱资源,并且可

以实现频谱资源的优化配置。例如,认知用户根据自己的需求和预算出价,出价高的用户获得频谱使用权,这样可以确保频谱资源被最需要它的用户获得。但是,基于拍卖理论的分配策略需要设计合理的拍卖机制,避免出现恶意竞价和垄断行为。例如,设置竞价上限和竞价次数限制,防止某些用户通过恶意抬高价格来垄断频谱资源。

4.2.3 基于博弈论的分配策略

基于博弈论的分配策略将认知用户之间的频谱竞争关系建模为博弈模型,通过求解博弈的均衡解来实现频谱分配。就像在市场竞争中,各个企业通过制定策略来争夺市场份额,最终达到一种平衡状态。该方法的优点是能够充分考虑认知用户之间的相互作用和策略选择,实现频谱分配的公平性和高效性^[4]。例如,采用纳什均衡理论,当每个认知用户都选择最优策略,且没有任何一方可以通过改变策略来提高自己的收益时,达到博弈均衡,实现频谱的合理分配。但是,基于博弈论的分配策略需要建立准确的博弈模型,并且求解博弈均衡解的难度较大。博弈模型的建立需要考虑多个因素,如认知用户的收益函数、策略空间等,而且求解均衡解可能需要复杂的数学运算。

结语

认知无线网络中,频谱感知与动态分配策略是提高频谱利用率、实现高效无线通信的关键。本文深入分析了频谱感知方法、挑战及协作技术,探讨了动态分配策略的目标、原则与方法。虽已有一定成果,但仍有问题待解。未来研究应着重提高频谱感知准确性与可靠性,设计更优动态分配策略,加强二者联合优化,推动与新兴技术融合,加快制定统一标准规范,以促进认知无线网络产业化发展。

参考文献

- [1]张兴才.认知无线网络中频谱资源管理策略研究[D].西安电子科技大学,2022.
- [2]金静,滕杰英,吴霄汉.基于机器学习的认知无线网络协作频谱检测[J].长江信息通信,2023,36(01):133-136.
- [3]李叶.基于单节点及多节点频谱感知的认知无线网络资源分配研究[D].西南交通大学,2021.
- [4]邹峰,李胜,刘明轩.基于区块链的认知无线网络电视频谱资源分配方法[J].电视技术,2024,48(04):43-48+56.